

南水北调东线灯泡贯流泵水力模型及装置研究开发与应用

冯旭松¹, 关醒凡², 井书光³, 汤方平⁴, 谢伟东⁵

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029; 2. 江苏大学 流体机械 engineering 研究中心, 江苏 镇江 212013;
3. 国务院南水北调工程建设委员会办公室, 北京 100053; 4. 扬州大学, 江苏 扬州 225009;
5. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 根据南水北调东线一期工程灯泡贯流泵站设计和建设需要, 以南水北调金湖泵站设计工况为基础, 自主研制开发贯流泵水力模型装置, 利用 FLUENT 软件进行了 CFD 流场计算分析和设计优化。通过天津同台测试和专家鉴定, 研制开发的两套水力模型装置最优工况点效率分别达到 79.4% 和 81.9%, 空化比转速达到 1100 以上。装置模型综合性能良好, 运行范围宽, 适用于 1.0~4.5 m 的特低扬程泵站, 在 3 m 扬程下和相同性能的立式轴流泵相比, 效率约提高 5%, 流量提高 10% 以上。同时, 在水泵模型设计和装置性能优化方法上有所创新。

关键词: 贯流泵; 装置; 水力模型; 性能试验; 泵站; 轴流泵

中图分类号: TV68; TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2009)06-0032-04

Development and Application on Hydraulic Model and Equipment of Bulb Tubular Pumps in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project

FENG Xu-song¹ GUAN Xing-fan², JING Shu-guang³, TANG Fang-ping⁴, XIE Weidong⁵

(1. Jiangsu Water Sources Co., Ltd., the Eastern Route Project of the South-North Water Transfers, Nanjing 210029, China;
2. Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
3. The Office of the South-to-North Water Diversion Project Construction Commission of the State Council, Beijing 100053, China;
4. Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
5. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract: According to design and construction of the bulb tubular pump stations in the first phase of South-to-North Water Transfer Project, based on the condition of Jinhu pump station, R&D were made on the hydraulic model and equipment of bulb tubular pumps, the flow field was calculated and analyzed by computational fluid dynamics (CFD) with FLUENT code and the hydraulic model was optimized. Tested by Tianjin test-bed and judged by the experts, for two hydraulic model and services, the best power efficiency reaches 79.4% and 81.9% respectively, and cavitation specific speed is over 1100. The integrated capability is advanced with wide high-efficiency scope adapting to the pump station which water head is between 1.0~4.5 m. Compared with a like vertical axial flow pump, the bulb tubular pumps raised the power efficiency over 5% and flow capacity over 10%. The methods of hydraulic model design and equipment optimization was also innovated.

Key words: bulb tubular pumps; equipment; service test; pump station; axial flow pump

根据《南水北调东线一期工程可行性研究报告》, 东线一期工程共需新建 21 座泵站, 均为低扬程、大流量, 其中约 1/3 泵站采用贯流泵机组, 贯流泵在其它水利和城市排水等方面也具有广阔的应用前景^[1]。灯泡贯流泵借鉴了灯泡式水轮机的设计理念^[2], 具有结构紧凑、进出水流道顺直、流态均匀等特点, 水力性能较优, 尤其适用于低扬程、大流量泵站工程建设^[3]。但由于其结构相对复杂、管理维护要求高,

目前国内工程应用较少, 在设计、制造和安装等方面还缺乏成熟经验^[4]。在水力模型方面, 参加天津同台试验的 27 个水力模型中^[1], 最优工况点扬程在 4.5 m 以下的水力模型很少, 4 m 以下的轴流泵模型只有一个(TJ04-ZL-07, $H_0=3.68$ m), 远不能满足工程建设的实际需要; 在装置研究方面, 针对灯泡贯流泵装置模型试验的研究成果很少, 对灯泡贯流泵装置特性的认识不足。目前正在实施的淮阴三站、

收稿日期: 2009-12-08 修回日期: 2009-12-10

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A03)

作者简介: 冯旭松(1973-), 男, 江苏阜宁人, 高级工程师, 工学博士, 现从事南水北调东线工程建设管理工作。

蔺家坝站等 4 座灯泡贯流泵站均采用国外技术^[5]，机组造价约为国内产品的 4~5 倍。目前，尚有金湖站、泗洪站、邳州站等 3 座贯流泵站有待建设，因此，在学习、消化国外技术的同时，加强灯泡贯流泵装置水力特性和模型研究开发，对于提高国内灯泡贯流泵设计、制造水平，逐步实现灯泡贯流泵的国产化，具有十分重要的意义。

1 研究任务和目标

针对南水北调东线一期江苏段金湖站、泗洪站等工程设计和建设需要，由南水北调东线江苏水源有限责任公司组织江苏大学、扬州大学、江苏省水利勘测设计研究院有限公司等有关方面的专家、科研人员成立课题组，重点进行灯泡贯流泵装置水力特性、模型开发及试验研究。主要任务：①根据金湖站工程技术参数，自主进行灯泡贯流泵装置和水泵模型的研制开发，适宜在 2~4 m 扬程范围高效运行，比转数 1 000~1 300，装置效率大于 78%；②通过灯泡贯流泵装置三维紊流数值计算和模型试验，研究灯泡贯流泵装置的水力特性；③推广应用灯泡贯流泵装置研究成果。

2 主要研究内容和成果

2.1 基本参数

在南水北调东线工程待建的贯流泵泵站中，金湖站需兼顾调水和排涝两个工况，特征扬程的变幅为 1.45~6.0 m，泵站选型及水力模型设计难度相对较大，本次研究主要针对对金湖站设计工况开展。通过江苏省水利勘测设计研究院有限公司的初步选型研究，提出贯流泵装置的主要结构尺寸^[6]，见图 1。

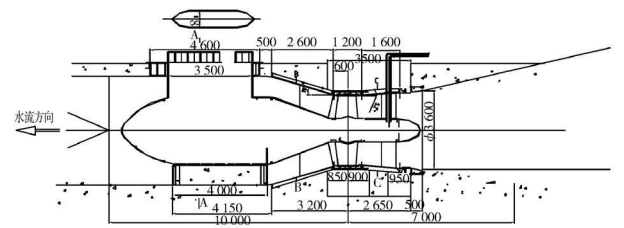


图 1 金湖泵站贯流泵初步设计单线图

其中，水泵叶轮直径 $D_p = 3.30$ m；水泵转速 $n_p = 125$ r/min；原型泵装置总长度 33.50 m；灯泡比 0.939 D_p ；设计扬程 2.35 m；设计流量 37.5 m^3/s 。

2.2 前、后置灯泡贯流泵水力特性

本次研究针对原型贯流泵装置尺寸和部分模型贯流泵装置尺寸，对前、后置灯泡贯流泵装置进行了 CFD 计算分析，采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型求解不可压缩液体 RANS 方程^[7]。在分析的贯流泵结构尺寸范围内，后置灯泡贯流泵装置的性能均优于前置灯泡贯流泵装置。后置灯泡支撑的水力损失较前置大，但同时又有回收环量的作用，而前置灯泡贯流泵装置导叶之后基本上已无回收环量的作用，因此，对前置灯泡贯流泵装置导叶和出水流道的设计要求更高，在泵装置总长度不变的情况下，要使前置灯泡贯流泵装置的性能超越后置灯泡贯流泵装置难度较大，本次研究主要

考虑后置灯泡贯流泵方案^[8]。

2.3 装置设计及优化

2.3.1 叶轮及导叶设计

基于对系列高效轴流泵叶轮的环境统计规律，设计时考虑的主要原则如下。

①考虑轴流泵进口预旋，轮毂、轮缘等边界条件对轴流泵环量分布和性能的影响；②通过减小轮毂侧的叶片角和增大外缘侧的叶片角，减小叶片扭曲度，扩大高效范围；③叶片出口采用非线性环量分布。通过在扬程 2~6 m、比转速 1 000~1 250 范围内进行设计计算和优化，新设计的 2 副水泵模型叶轮直径 $D_2 = 300$ mm，轮毂比为 0.326，叶片数为 3 枚，导叶叶片数为 5 枚。叶轮及导叶三维图见图 2。

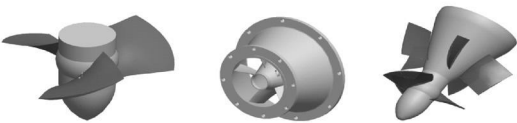


图 2 叶轮和导叶三维图

2.3.2 装置设计优化

本次研究在江苏省水利勘测设计研究院有限公司初步选型基础上，对试验用贯流泵装置模型进行了优化设计，其中包括利用 FLUENT 软件进行 CFD 流场设计^[9]。水泵的运行特性是由水泵本身和与水泵配合的流道共同决定的，是一个有关联的系统，水泵配合的管道不仅造成水力损失，而且影响水泵的运行工况，可使水泵在偏离设计工况的条件下运行，造成水泵运行效率的下降，对低扬程泵站更为明显。因此，将整个水泵装置作为一个整体，数值模拟水流从进水流道经过包括旋转转轮的泵段到出水流道的流动，对泵站设计具有更为重要的指导意义。

研究中采用标准 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型和 SIM PLEC 算法，将灯泡贯流泵装置内部流动的水体区域分成 4 个部分：①进水流道；②水泵叶轮；③导叶体；④出水流道。计算模型见图 3 所示。采用非结构化网格，并对局部进行加密。采用速度进口和自由出流边界条件，运用动静参考系处理叶轮和流道的动静区域，设置叶轮的转速为 1 450 r/min。设定叶轮和导叶表面粗糙度为 6.3，流道表面粗糙度为 12.5。并进一步探讨叶片出口和导叶之间的距离 L 对流动和效率的影响，进行了流动分析和优化，为装置试验提供科学依据。

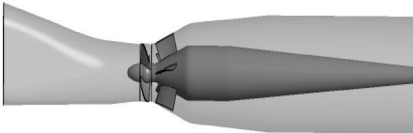


图 3 计算模型

经优化后的装置设计图见图 4 所示。

2.3.3 装置模型试验

2009 年 1 月在天津中水北方试验台组织贯流泵装置模型进行同台测试，送试的 GL-08-01 模型、GL-08-02 模型，设计扬程分别为 3 m 和 4 m。转轮设计特征参数见表 1。

4 推广应用

该研究成果中 GL-08-01 水力模型装置已应用于江苏省通榆河北延送水工程灌河北站、善后河南站工程建设及南水北调东线一期金湖站和泗洪站工程设计选型, 具有推广应用价值。

5 结论

- ①研究开发的贯流泵装置模型 GL-08-01 (比转速为 1 342) 和 GL-08-02 (比转速为 1 109) 最优工况点效率分别达到 79.4% 和 81.9%, 空化比转速达到 1 100 以上。装置模型综合性能良好, 运行范围宽, 适用于 1.0~4.5 m 的特低扬程泵站。初步试验研究表明, 贯流泵和普通立式轴流泵相比, 性能指标有一定优势。对于本次试验的扬程为 3 m 的模型, 与采用普通立式轴流泵相比^[10], 在低扬程区域贯流泵比普通轴流泵效率提高约 5%, 流量提高 10% 以上。
- ②设计了一种厚度和拱度分布规律适合水力机械特点的翼型, 叶片在轮毂侧前伸、在轮毂侧后掠, 提高了效率和抗汽蚀性能, 扩大了高效稳定运行范围。
- ③考虑贯流泵进口预旋、轮毂、轮缘对流动的影响, 叶片出口采用非线性环量分布, 减小了径向流动, 改善了小流量区域的不稳定性。
- ④利用 CFD 对贯流泵及其装置内部流动进行了数值模拟, 优化了叶轮与导叶的相对位置及进出水流道线型, 减小了水力损失, 提高了装置效率。

⑤研究开发的水力模型可用于竖井贯流泵, 也可用于开敞式轴流泵 (因叶轮和导叶结构形式相同)。后置灯泡贯流泵装置基本相同, 研究成果已应用于工程实践, 所以本试验结果可直接用于工程设计。

参考文献:

[1] 刘宁, 汪易森, 张纲. 南水北调工程水泵模型同台测试 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[2] 沙锡林. 贯流式水电站 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[3] 朱红耕, 张仁田, 冯旭松, 等. 不同型式贯流泵装置结构特点与水力特性分析 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 58-60.

[4] 金燕, 刘超, 汤方平, 等. 贯流泵装置的研究进展和应用 [J]. 水泵技术, 2009, (4).

[5] 曾江, 李缙. “能为南水北调工程做点力所能及的工作是我有生最大的愿望” 江苏大学流体机械研究中心关醒凡教授访谈录 [J]. 通用机械, 2004, (1): 8-10.

[6] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 南水北调东线一期金湖站工程初步设计报告 [R], 2008.

[7] 汤方平, 刘超, 周济人, 等. 低扬程贯流泵装置模型试验研究 [J]. 水泵技术, 2004, (4).

[8] 南水北调东线江苏水源公司, 江苏大学, 扬州大学, 等. 南水北调东线一期工程低扬程大流量水泵装置水力特性模型开发及试验研究 [R], 2009.

[9] 关醒凡, 谢卫东, 朱泉荣, 等. 后置灯泡式贯流泵装置水力模型 [J]. 排灌机械, 2008, 26(1), 25-28.

[10] 关醒凡, 伍杰, 朱泉荣. 南水北调东线已招标泵站水泵模型装置试验成果及分析 [J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 1-7.

(上接第 3 页)

参考文献:

[1] 吴炳方, 颜长珍. 南水北调工程建设的目标管理 [J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(4): 1-3.

[2] 孙建平, 刘彬. 南水北调工程建设与运行管理信息化初探 [J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(6): 19-24.

[3] 刘春生. 南水北调工程水价的合理确定 [J]. 水科学进展, 2004, 15(6).

[4] 张贵金. 工程造价管理信息系统设计 [J]. 人民长江, 1998, (11).

[5] 刘国纬著. 跨流域调水运行管理——南水北调东线工程实例研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.

[6] 中水淮河有限公司, 等. 南水北调东线第一期工程可行性研究总报告——专题报告 5 [R]. 2001.

[7] 中水淮河有限公司, 等. 南水北调东线第一期工程可行性研究报告 [R]. 2005.

[8] 李红仙, 周海炜. 南水北调工程分解结构体系研究 [J]. 水利经济, 2009, (05).

[9] 丰景春, 曹为民. 项目组合的全生命周期研究 [J]. 项目管理技术, 2009, (10).

[10] 王慧敏, 胡震云. 南水北调供应链运营管理的若干问题探讨

[J]. 水科学进展, 2005, (6).

[11] 王慧敏, 王慧, 仇蕾, 等. 南水北调东线水资源配置中的期权契约研究 [J]. 中国人口资源与环境, 2008, 18(2).

[12] 王慧敏, 张莉, 杨玮. 南水北调东线水资源供应链定价模型 [J]. 水利学报, 2008, 36(9).

[13] 钟登华, 刘勇. 水利水电工程施工水流控制过程的仿真与优化方法 [J]. 中国科学, 2009, (07).

[14] 罗辛, 吴晶. 轻量级门户单点登录服务机制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, (06).

[15] 熊璋, 秦颖. 南水北调中线干线工程财务资产管理系统设计与实现 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, (05).

[16] 翟宜峰, 熊璋, 侯召成, 等. 基于工作流的南水北调中线运营调度建管系统设计及实现 [J]. 南水北调与水利科技, 2008, (5): 4-7.

[17] 熊璋, 汪明. 基于 LDAP 技术的南水北调中线建管系统的用户管理机制 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, (6).

[18] 张奕韬, 万定生. 水文时间序列关联规则挖掘模型研究 [J]. 计算机与数字工程, 2008, (12).