

潜水贯流泵装置在扬州闸泵站中的应用分析

葛恒军¹, 袁海霞¹, 丁 平², 蒋东进³, 杨 帆³

(1. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007;

2. 扬州市水利工程建设中心, 江苏 扬州 225001; 3. 扬州大学, 江苏 扬州 225009)

摘要:扬州闸泵站具有抽排和抽引的双重作用,其抽排设计净扬程为 2.44 m,设计抽排流量为 72 m³/s,抽引设计净扬程为 0.65 m,设计抽引流量为 29 m³/s,属于大(Ⅱ)型泵站。针对扬州闸泵站的功能需求及扬程特点,对 4 种不同型式的贯流泵装置方案进行了比选,最终确定采用潜水贯流泵装置型式,对比了单向潜水贯流泵装置电机前后置方案,分析了电机前后置对泵装置能量性能及内流场的影响,电机后置方案明显优于电机前置方案,该泵装置结构型式的应用可为同类型泵站的选型与设计提供一定的技术参考。

关键词:潜水贯流泵; 选型; 水力性能; 数值模拟; 扬州闸泵站

中图分类号:TH312

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2021)11-0023-05

Application analysis of submersible tubular pump device in Yangzhou sluice pumping station

GE Hengjun¹, YUAN Haixia¹, DING Ping², JIANG Dongjin³, YANG Fan³

(1. Yangzhou Surveying and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China;

2. Water Conservancy Project Construction Center of Yangzhou City, Yangzhou 225001, China;

3. Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Yangzhou sluice pumping station has the dual functions of pumping and drainage. The designed net head of drainage is 2.44m and the designed drainage flow rate is 72 m³/s, while the designed net head of pumping is 0.65m and the designed pumping flow rate is 29 m³/s, which belongs to the large (Ⅱ) pumping station. According to the functional requirements and head characteristics of Yangzhou sluice pumping station, four different types of tubular pump device schemes were compared and selected, and finally the type of submersible tubular pump device was determined. The front and rear motor schemes of unidirectional submersible tubular pump device were compared, and the influence of the front and rear motor on the energy performance and internal flow field of the pump device was analyzed. The result showed that the rear motor scheme was significantly better than the front motor scheme. The application of the pump device structure type could provide certain technical reference for the selection and design of the same type of pumping station.

收稿日期:2021-06-04

基金项目:国家自然科学基金(51609210);扬州市校企合作科技资金项目(YZU201901);扬州市绿扬金凤计划领军人才项目(LYJFLJ-2019082);江苏省水利科技项目(2020029)

作者简介:葛恒军(1972—),男,高级工程师,主要从事水利工程规划及设计。E-mail:401537497@qq.com

通信作者:杨 帆(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要从事低扬程泵及泵装置水力特性及优化研究。E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

Key words: submersible tubular pump; selection; hydraulic performance; numerical simulation; Yangzhou sluice pumping station

贯流泵以电机与齿轮箱的安装布置位置不同主要被划分为竖井式、轴伸式与潜水式,属于低扬程卧式轴流泵,其进出水流道位于一条直线上,且结构紧凑,水力损失少,效率高,常应用于低洼地区的排涝及灌溉^[1]。随着城市建设的愈发完善,城市供水与防洪排涝的要求对泵站的建设提出了更高的要求,在此社会背景下,对低扬程泵站的研究显得尤为重要。潜水贯流泵装置利用潜水电泵的技术,其水泵转轮、后导叶、齿轮箱、电机连为一体布置在流道中,相较于其他泵型,其具有水力性能好、效率高、流道水力损失小及土建结构简单等优点^[2],因此在沿江滨湖地区的低扬程泵站中得到了较好的应用,如广东佛山的沙头电排站、上海北横泾泵站等工程。近年来国内外的学者对潜水贯流泵装置展开了不少的研究,如方桂林等^[3]针对灌北、善南泵站设计扬程特低的特点,选用了潜水贯流泵装置,针对该泵装置,从水力性能、土建结构、效率等方面进行了综合分析,并在工程应用当中取得了理想的效果;杨帆等^[4]分析了灯泡体段对双向潜水贯流泵装置正反向运行的影响;严继松等^[5]研究了双向潜水贯流泵装置的能量与振动特性;付强等^[6]采用 RNG $k-\omega$ 湍流模型和滑移网格技术对无导叶、直导叶、弯导叶潜水式贯流泵进行了非定常数值计算,分析了不同工况下监测点的压力脉动分布规律;赵政等^[7]分析了国内外现有双向功能泵组及泵站的机构形式,进行了技术经济比选,同时针对上海市木渎港泵闸工程的设计,提出了大型双向潜水泵泵组选择的原则及应用趋势。由上述可知,本领域的学者与相关的工程技术人员针对潜水贯流泵装置取得的研究成果与工程技术经验在国内外众多低扬程泵站中均得到了成功的应用,同时也在应用潜水贯流泵装置的泵站运行管理方面积累了丰富的经验。

本文以扬州闸泵站为研究对象,探讨该泵站泵装置的结构选型,在满足抽排、抽引双向抽水的工程需求的基础上,对单向潜水贯流泵装置的电机前后置进行方案比选。

1 工程概况

古运河北有扬州闸与淮河连接,南边有瓜洲闸与长江相连通,主要依靠水位差自流排涝,是整个

扬州市主城区外围防洪圈的主要排涝河道。扬州城区现有泵站 67 座,设计总抽排流量 $82.59 \text{ m}^3/\text{s}$,城区排水入古运河能力基本上达到了 10 年一遇的标准,但汛期时长江及淮河的水位增高将导致古运河自排受阻,严重威胁扬州市整个主城区的防洪排涝安全。建设古运河外排泵站是解决汛期主城区涝水外排的关键工程。

扬州闸泵站位于原扬州闸北侧节制闸位置处。原扬州闸未建泵站,主要依靠扬州北高南低的地形优势将涝水排入古运河后才能入江、入淮。在干旱及洪涝时期,水位的变化将导致古运河水位无法实现自引自流。所以新建扬州闸泵站进行排涝与引水显得尤为重要,扬州闸泵站是主城区治理方案中关系全局的关键性工程,同时也是扬州市城市防洪建设的重中之重。经过进一步的论证,扬州闸泵站的抽排设计流量为 $72 \text{ m}^3/\text{s}$,抽引设计流量为 $29 \text{ m}^3/\text{s}$,属于大(Ⅱ)型特低扬程泵站,泵站特征扬程如表 1 所示。

表 1 泵站特征扬程 单位:m

抽排(内河→外河)			抽引(外河→内河)		
设计 净扬程	最高 净扬程	平均 净扬程	设计 净扬程	最高 净扬程	平均 净扬程
2.44	3.41	1.35	0.65	0.80	0.33

注:水位为清污机前水位;最低净扬程小于 0m,故本表未示。

扬州闸泵站的主要任务是排除扬州市城区及周围区域的涝水及汇水,控制古运河水位,提高城市防洪能力的重要民生工程。扬州闸泵站泵装置的选型需要从技术、经济以及运行管理等方面进行综合考虑,机组在满足经济合理的同时需要保证高效率,且高效范围宽;机组的运行要安全可靠,在国内外成功运用并且取得了很好的技术经验;汛期来水大,需要机组调节灵活、操作方便,以应对流量需求的变化;汽蚀性能好,减少机组在使用期间的检修次数。

2 泵装置结构比选

扬州闸泵站具有运行扬程低、流量大、双向抽水及年运行时间短等特点。扬州闸泵站以抽排为

主,结合抽引,设计抽排流量 $72 \text{ m}^3/\text{s}$,抽引流量为 $29 \text{ m}^3/\text{s}$,抽排与抽引流量相差较大。本工程泵站抽排设计净扬程为 2.44 m ,抽引的设计净扬程仅为 0.65 m ,属于特低扬程泵站^[2],宜采用装置效率相对较高且开挖深度小、结构简单、便于管理的单双向组合卧式装置机组型式的贯流泵,双向贯流泵使用时只要改变电机旋向,就可以实现双向抽水,而无需把水泵拆卸掉头。具有双向功能的贯流泵装置主要有灯泡式贯流泵装置、竖井式贯流泵装置、平面 S 形贯流泵装置以及潜水贯流泵装置 4 种装置形式,此 4 种贯流泵装置在实际工程中均得到了较好的应用^[2],根据扬州闸泵站的运行特点,结合现有的地形条件及以往类似的工程经验,基于 4 种泵装置的优缺点及各自的应用效果进行综合比选。

(1)方案 1:灯泡贯流泵装置。该泵装置中的水流方向基本上轴向通过流道,并轴对称流过水泵的叶片,最符合水泵叶轮设计的基本假设条件,理论上这种结构型式水力性能较佳,流道效率高,其装置水力性能优于立式机组,能降低泵站运行成本。但是,在低扬程或极低扬程情况下,灯泡贯流式泵装置要获得的中高扬程立式水泵装置的效率,在目前的技术水平下仍难以实现。另外,由于灯泡贯流泵结构复杂,出水流道较短,对出水流道和后导叶体等水力元件较高的泵站,安装维修不便。

(2)方案 2:竖井贯流泵装置。竖井贯流式机组与灯泡贯流式相比,结构简单,造价较低。由于竖井开敞,通风和防潮条件良好,运行和维护也较方便。水流从竖井的两侧引入水泵(前置)或排向出水侧(后置),水力性能介于灯泡贯流式和轴伸贯流式之间。竖井本身尺寸笨重、刚度大,受力及变形分析比较简单,传力路径明确,不像灯泡贯流式机组那样需要进行结构应力与变形的模拟分析和模型试验。该泵装置造价低,结构简单,运行可靠且适用范围广,但效率一般,土建投资较大。

(3)方案 3:轴伸贯流泵装置。轴伸贯流式机组型式多种多样,主水泵机组的主要部件经常处于水面以上,对密封的要求比较低,检查、维修和保养方便,拆卸时不必像立式泵那样需要拆除电动机。单位面积上的荷载小,尤其适合于软土地基。起重机的起吊荷载小,提升高度小,泵房结构相对简单。结构上避免了灯泡贯流泵的一些缺点,易于运行管理和维护。但是由于其进出水流道没有灯泡贯流泵顺直,有弯管存在,从而增加了流道的水力损失,装置效率稍逊于灯泡贯流泵。

(4)方案 4:潜水贯流泵装置。潜水贯流泵式机组的水泵转轮、后导叶、齿轮箱、电机连为一体直接布置在流道中,机组段采用全金属壳体,整体吊装,安装方便。电机、齿轮箱在水中,设备外壳利用流动的水流冷却,潜水电机设有渗漏、过载、过流、温度等检测、保护装置。潜水贯流式机组利用了潜水电泵的技术,保持了灯泡贯流泵水力性能好、效率高的特点,具有土建结构简单、机组结构紧凑、流道水力损失小等优点,但设备可靠性要求高,密封止水要求高。

灯泡式贯流泵结构较为复杂,对密封性要求较高,维修不方便,后期的运行维护成本高。若采用竖井贯流泵方案,由于竖井的空间狭小,电机和齿轮箱等被布置在狭小的竖井里面,会给安装以及后期的检修带来很大的不便。轴伸贯流式包括平面轴伸贯流式和立面轴伸贯流式 2 种型式,分别采用平面 S 形流道和立面 S 形流道,电动机和齿轮箱布置在流道外侧,水泵轴伸出流道外与电机、齿轮箱连接,具有结构简单,通风防潮条件良好,运行维护方便,密封止水要求不高等优点,但轴伸贯流式机组直径不宜过大,否则会造成机组主轴太长,而且中间没有任何支承,导致机组运行不稳定。潜水贯流式泵站结构紧凑,能降低土建的成本,并且现场安装方便快捷,产生的噪声低,泵站内无高温,具有极高的可靠性,虽然潜水泵的检修需要返厂处理,但是由于扬州闸泵站的年运行时间短,有充足的时间进行返厂检修,故不影响扬州闸泵站的运行管理,因此推荐采用潜水贯流泵方案。

3 电机前后置方案的数值比选

扬州闸泵站共 4 台机组,其中 2 台采用单向潜水贯流泵装置,2 台采用双向潜水贯流泵装置,电机的安置位置对单向潜水贯流泵装置水力性能的影响较为明显^[8],本文采用数值模拟方法对扬州闸泵站初设单向潜水贯流泵装置的电机前后置进行方案比选。

3.1 流场计算区域

图 1 为电机前置的单向潜水贯流泵装置单线图,图 2 为电机后置的单向潜水贯流泵装置单线图。电机前后置潜水贯流泵装置的三维湍流流动数值计算区域包括进水流道、叶轮、导叶、电机段、出水流道等 5 个部分组成。基于模型泵装置进行 CFD 计算,采用 PTC Creo 和 ANSYS ICEM 软件对进水流道和出水流道进行实体建模与网格剖分,通过

角度值和雅克比行列式对网格质量进行检测,雅克比行列式值均大于 0.4,满足。采用 ANSYS Turbo-grid 软件对叶轮和导叶体建模与网格剖分,叶轮网格正交性角度在 $21^{\circ} \sim 161^{\circ}$ 之间,导叶网格正交性角度在 $37^{\circ} \sim 158^{\circ}$ 之间,满足文献[10]对网格的正交性角度要在 $15^{\circ} \sim 165^{\circ}$ 之间的要求。

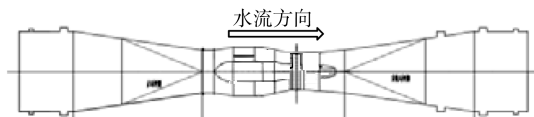


图 1 单向潜水贯流泵装置单线图(电机前置)

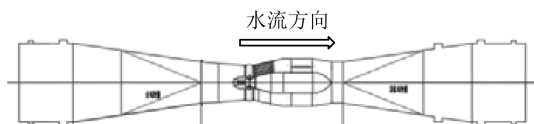


图 2 单向潜水贯流泵装置单线图(电机后置)

3.2 控制方程及边界条件

泵装置内部流动介质为水,可简化为不可压缩的牛顿液体,采用的控制方程为雷诺平均 N-S 方程(RANS),紊流模型采用 SST $k-\omega$ 紊流模型。

为了更好地模拟泵装置内部流动,在进水流道前加一段延伸段,进口设置在延伸段的进口断面,采用总压进口条件,总压设置为 1 atm。同样地,在出水流道后也增加一段延伸段,将计算流场的出口设置在出水流道后的延伸段的出口断面,出口断面采用质量流量出流。紊流模型不适用于壁面边界层内的流动,所以对壁面需进行处理才能保证模拟的精度。泵装置的进、出水流道、叶轮外壳及导叶体均设置为静止壁面,应用无滑移条件,近壁区采用可伸缩壁面函数。

3.3 数值计算结果分析

图 3 和图 4 分别为电机前置的单向潜水贯流泵装置三维流线图及内部断面速度分布图,电机前置的潜水贯流泵装置的进水流道内部流线平顺,水流贴合壁面,入流状态较好,而出水流道内部出现了脱流区域,水流呈螺旋状,在出水流道内部断面也存在相应的低速区。采用文献[10]中泵装置能量性能的预测方法,电机前置的单向潜水贯流泵扬程为 2.65 m,泵装置效率为 74.49%。

图 5 和图 6 分别为电机后置的单向潜水贯流泵装置三维流线图及内部断面速度分布图,电机后置时,进出水流道内部的流场较电机前置时得到了明显的改善,流道内部的脱流区域明显减少。电机后置的单向潜水贯流泵在扬程 2.69 m 时,泵装置效率为 76.9%。综上对比分析,电机后置的单向潜水

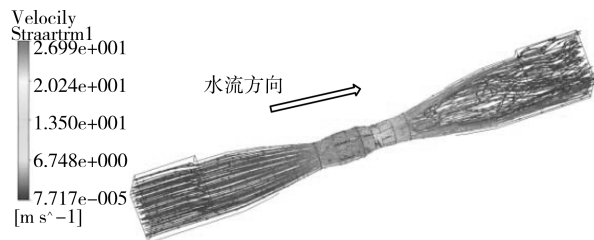


图 3 潜水贯流泵装置内部流线图(电机前置)

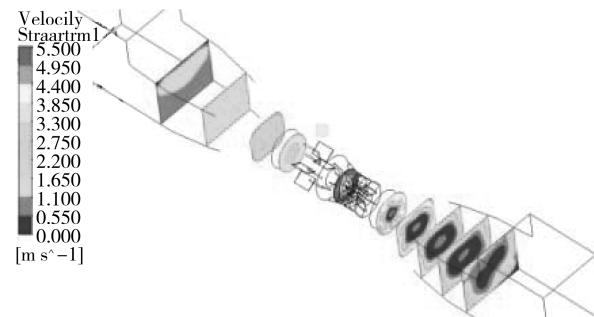


图 4 潜水贯流泵装置内部速度云图(电机前置)

贯流泵装置性能明显优于电机前置方案,扬州闸泵站单向潜水贯流泵装置选择电机后置方案,并基于此后期将开展潜水贯流泵装置结构的水力优化,以期进一步提升泵装置的效率。

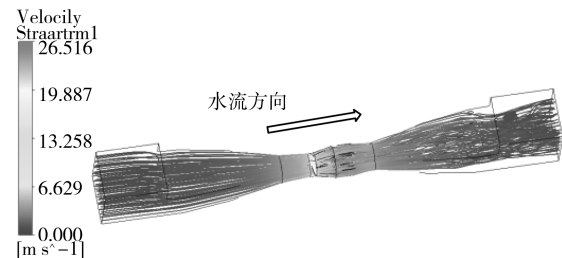


图 5 潜水贯流泵装置内部流线图(电机后置)

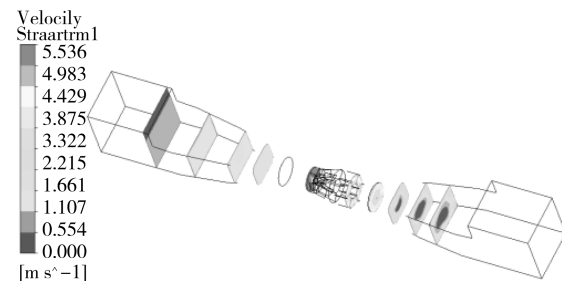


图 6 潜水贯流泵装置内部速度云图(电机后置)

4 结 论

(1)扬州闸泵站属于大(Ⅱ)型特低扬程泵站,针对其扬程低、双向运行的特点,在满足泵站抽排、抽引的条件下,对比分析了 4 种贯流泵装置,最终确定采用潜水贯流泵装置结构形式,其中 2 台采用单向潜水贯流泵装置,2 台采用双向潜水贯流泵装置。

(2)采用数值模拟方法分析了电机前后置对单

向潜水贯流泵装置水力性能的影响,电机后置的潜水贯流泵装置性能明显优于电机前置方案。电机后置的单向潜水贯流泵装置内部的流态较好,比选结果可为同类型的泵站设计提供思路,后期将开展扬州闸泵站装置结构的优化工作,以期进一步提升扬州闸泵站的泵装置效率。

参考文献:

- [1] 赵文龙,周大庆,郑源,等. 适用于高扬程的贯流泵设计及试验[J]. 中国农村水利水电, 2018(7):138-141.
- [2] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6):49-59.
- [3] 方桂林,谢伟东,邓悌康. 通榆河北延送水工程灌北、善南泵站泵装置的选型与设计[J]. 江苏水利, 2009(11):19-20, 22.
- [4] 杨帆,金燕,刘超,等. 双向潜水贯流泵装置性能试

验与数值分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 60-67.

- [5] 严继松,郑源,张占,等. 双向潜水贯流泵能量特性与振动模型试验[J]. 人民长江, 2008(13): 82-84.
- [6] 付强,王振伟,朱荣生,等. 潜水式贯流泵导叶特性非定常流场的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2012(5):109-112, 116.
- [7] 赵政,卢智灵,陆卫安,等. 双向大型立式潜水泵在城市水环境整治中的应用[J]. 排灌机械, 2005(6): 23-25.
- [8] 陆伟刚,王东伟,施伟,等. 电动机前置和电动机后置潜水贯流泵装置水力性能比较[J]. 排灌机械学报, 2020, 38(4):325-331.
- [9] 资丹,王福军,陶然,等. 边界层网格尺度对泵站流场计算结果影响研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 139-149.
- [10] 杨帆. 低扬程泵装置内流特性及水力稳定性[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.

(上接第 22 页)

器精度,可以避免很多由于开度仪引起的故障事故的发生。

2.4 主变、站变故障与励磁系统故障

(1)采用与泵站相配套的电机设备

在选择机组前事先考察机组运行环境,选择与泵站适配的机组,如电气方面避免出现电机配套功率偏低而机组启动困难,还有投励电压过低无法满足机组启动要求等的故障^[7]。

(2)更换合适的装置。在当前设备不符合泵站运行要求时则需要结合泵站运行环境与运行要求等多方面因素选择更加合适的设备,如 2 号泵站励磁系统故障案例中最终更换了整套励磁设备^[7]。

(3)加大日常巡检力度。主变、站变的各类仪器在常年使用中出现老化损坏是很常见的,在老化损坏问题出现时如果可以及时发现并更换损坏设备,则可以把故障带来的危害控制在最低。

(4)采用质量合格的设备,优化设备安装方法与精度。很多装置设备如接线头、仪表盘等也需要采用质量优秀的产品,很多由于小型设备损坏而导致的故障都可以通过改善设备本身来解决,同时很多由于设备安装精度的设备自身局限性而引发的故障,则需要从根本技术层面来进行改善与解决。

3 结 语

本文介绍了大型灯泡贯流泵站典型故障,重点

分析了其发生原因并且提出解决方案与预防措施。可以看出,灯泡贯流泵结构复杂,在恶劣的运行环境下故障原因繁多且复杂,泵站故障发生时,合理的评估与正确的应对方法可以有效减少泵站故障带来的损失与危害,该成果可为同类型泵站的运行管理提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 胡立新. 灯泡贯流式机组轴承润滑油系统故障分析及对策[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(6):59-61.
- [2] 孙洪斌,鲁靖华,郑源,等. 淮安三站大型贯流机组运行存在问题及分析[J]. 水泵技术, 2007(5):36-40.
- [3] 董于. 浅析淮安三站机组叶片气蚀问题[J]. 硅谷, 2008(13):1-2.
- [4] 林琳. 水利泵站设备故障分析与管理维护要点[J]. 科技创新与应用, 2020(21):183-184.
- [5] 黄建. 裴家圩泵站卧式贯流泵轴密封与导轴承的故障与修复改造[J]. 水泵技术, 2007(1):43-45.
- [6] 周伟,刘雪芹,唐秀成. 金湖泵站贯流泵机组水力性能及结构特点分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(7):104-106.
- [7] 钱邦永. 淮安三站无刷励磁系统改造浅析[J]. 江苏水利, 2006(2):28-29.
- [8] 戴启璠,梁豪杰,孟小敏,等. 淮安三站灯泡贯流泵装置优化研究[J]. 江苏水利, 2016(10):38-41, 53.