

大套一站水泵装置模型试验研究

费海蓉¹, 吕赛军¹, 戴龙洋¹, 朱红耕²

(1. 盐城市水利勘测设计研究院, 江苏 盐城 224002; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 大套一站是集灌溉、排涝、降渍等多功能于一体的水利工程。为了保证大套一站安全与高效运行,在初步设计阶段运用计算流体动力学方法,对大套一站进出水流道进行了水力设计优化。优化设计结果表明,水泵的进水条件得到了改善,进出水流道的水力损失明显减小,水泵装置效率得到了提高。为了验证优化设计的效果,进行了水泵装置模型试验。

关键词: 水泵装置;优化设计;计算流体动力学;模型试验

中图分类号: TV675

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)01—0126—04

Pumping System Model Tests of Datao I Pumping Station

FEI Hai-rong¹, LV Sai-jun¹, DAI Long-yang¹, Zhu Hong-geng²

(1. Yancheng City Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Yancheng, Jiangsu 224002, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Datao I Pumping Station is a multi-purpose water conservancy project incorporating with irrigation, drainage and water-log control. To secure its safety and high-efficiency operation, a computational fluid dynamics(CFD) method was adopted to optimize the suction box and discharge passage of the station in preliminary design. The optimization results indicate that the flow conditions of pump are improved, the hydraulic losses of the suction box and discharge passage are reduced, and the pumping efficiency is raised. The pumping system model tests were carried out to verify the optimization results based on the CFD method.

Keywords: pumping system; optimal design; CFD; model test

大套一站是集灌溉、排涝、降渍等多功能于一体的水利工程,位于盐城市滨海县境内,北距废黄河约3 km,东距通榆河约2 km,担负着苏北灌溉总渠和废黄河两大灌区内的滨海、响水、阜宁、射阳四县与滨海、黄海、淮海、临海四大省属农场及灌东、新滩两大盐场的抗旱排涝和工农业生产、交通运输、人民生活用水等任务。大套一站已建成运行23 a,水工建筑物和机泵设备老化严重,严重影响工程安全。大套一站更新改造工程为拆除老站,重建新站,采用肘形进水、虹吸式出水的堤后式块基型泵房结构型式,灌溉与排涝工况设计扬程分别为4.8 m、5.2 m,安装1750ZLB10-7立式轴流泵5台套,叶轮直径1750 mm,转速214.3 r/min,单泵设计流量10 m³/s,配TL1000-24同步电机,总装机容量5000 kW。

为了保证泵站安全高效运行,大套一站在优化

水力设计的基础上,开展了水泵装置模型试验研究,验证数值计算方法的有效性和可靠性,检验水泵装置水力设计优化成果,提高水泵装置效率,为泵站设计和科学运行管理提供依据。

1 水泵装置优化设计方案

大套一站水泵装置水力设计优化是在满足《泵站设计规范》(GB/T50265-97)的基本要求下进行的^[1],在给定的水位资料和土建控制尺寸范围内,借助计算流体力学方法,开展水泵装置内部流动分析,实现大套一站水泵装置水力设计优化,提高水泵装置效率^[2-5]。

1.1 优化设计目标

在满足设备布置和水工结构设计要求的前提下,进水流道水力设计优化的目标是:①控制尺寸合

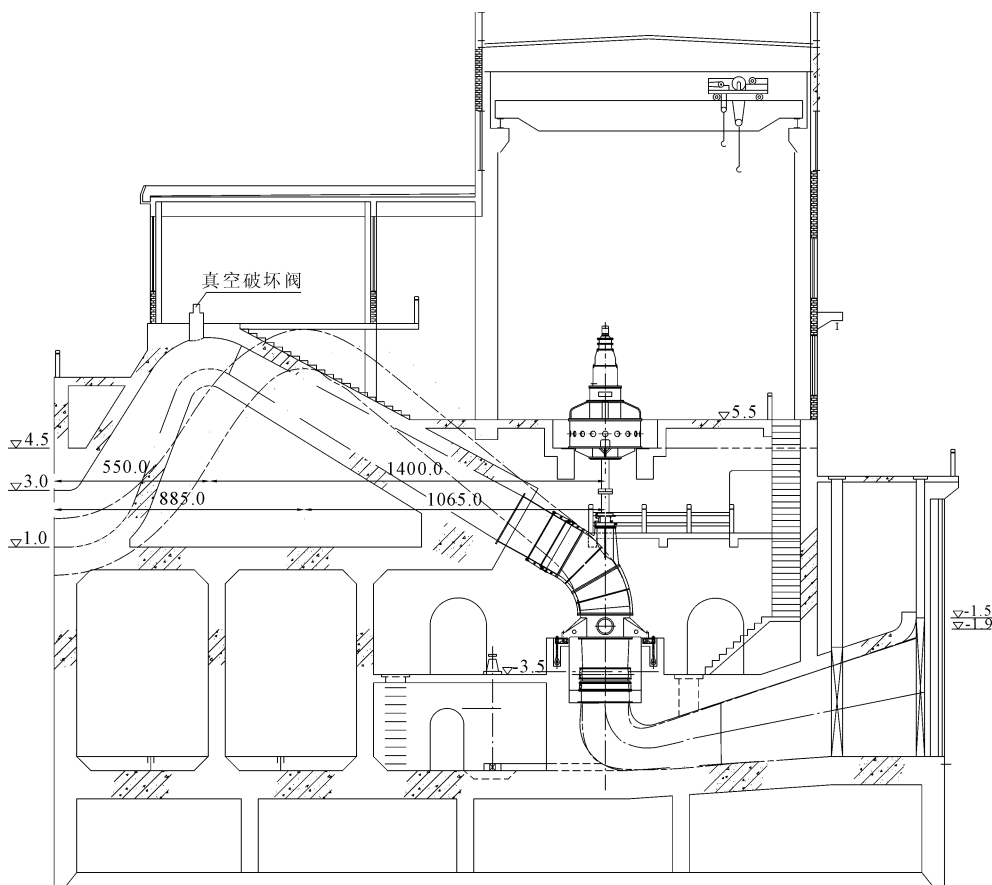
理,流道型线变化平顺,流道内无涡带或其它不良流态;②断面积沿程变化尽可能均匀,进口流速取值合理,出口断面的流速和压力分布比较均匀,为水泵提供良好的进水条件;③流道的水力损失尽可能小。

出水流道是连接水泵导叶出口与出水池的过流通道,具有长度较短、断面形状变化较大,水力损失占装置扬程的比例高的特点,对水泵装置性能的影响更为突出,其优化目标为:①流道型线变化均匀,扩散角取值合理,尽可能避免脱流、漩涡或其它不良流态;②流道出口流速适宜,尽可能回收水流动能;③流道的水力损失尽可能小。

1.2 优化设计方案

运用大型建模软件 Pro/E,建立了包括肘型进

水流道、水泵叶轮与导叶、虹吸式出水流道和进出水池在内的三维立体模型,采用 Gambit 进行网格剖分,根据质量守恒和动量守恒原理,利用 RNG 紊流模型封闭时均不可压 Navier-Stokes 方程组^[6-7],应用商用 CFD 软件 FLUENT 进行大套一站水泵装置内水流数值模拟,在泵站设计规范指导下,以满足泵站设计扬程下的流量为前提,结合泵站结构设计和内部设备布置,优化设计进、出水流道的型线,提高水泵装置效率^[5]。图 1 为大套一站水泵装置水力设计优化前后,进、出水流道型线的比较。优化设计后的肘形进水流道的水力特性得到了改善,水泵进口断面最大轴向流速减小,轴向流速分布均匀度提高了 5.18%,加权平均偏流角减小了 3.55°。



——— 优化设计前 - - - - - 优化设计后

图 1 优化设计前后水泵装置型线的比较

从图 1 可以看到,优化设计后大套一站的虹吸式出水流道驼峰顶部距机组中心距离缩短了 3.35 m,上升段的上升角,有利于水流转向;下降段水平长度的增加和下降角变缓,使得水流在下降过程中有较充分的空间逐步扩散和改变运动方向,设计流量下的水力损失减小了 0.099 m,有利于提高水泵装置效率。

2 模型试验台与试验方法

2.1 模型试验台

模型试验台为立式封闭循环系统,包括尾水箱、压力水箱、供水泵(或辅助泵)、测试系统、电动闸阀、手动蝶阀和管道等主要设备,按照《水泵模型及装置模型验收试验规程》(SL140-2006)进行设计与建

造,试验综合不确定度 $\leq 0.4\%$,可以进行各种水泵、水轮机的模型试验研究^[6]。

2.2 试验方法

大套一站水泵装置模型试验主要包括能量特性试验和汽蚀试验。根据模型试验结果,按照相似律进行原、模型水泵装置的流量、扬程和轴功率换算,原型和模型水泵装置的效率相等,不考虑比尺效应等因素的修正。

(1) 能量特性试验采用等扬程试验方法,即保持水泵装置原模型 $n_M D_M = n_P D_P$ 相等。根据相似律换算公式,由原型泵叶轮直径为 $D_P = 1750$ mm,额定转速为 $n_P = 214.3$ r/min,模型泵叶轮直径为 $D_M = 300$ mm,可求得模型泵装置试验额定转速为:

$$n_M = \frac{D_P n_P}{D_M} = \frac{1750 \times 214.3}{300} = 1250.1 \text{ r/min}$$

(2) 在完成每一个水泵叶片安放角度的性能试验后,立即进行该角度下的汽蚀试验。通过封闭循环系统内抽真空,逐步减小系统压力的方法,使泵内发生汽蚀。在某一特征扬程下,测试过程中保持流量不变,按效率下降 1% 确定为水泵装置临界汽蚀余量 $NPSH_r$ 。

(3) 调节辅助水泵转速,使模型水泵装置的出口和进口侧形成不同的水位差,测量电机输入功率为零时,水泵叶轮最大的反转转速。

3 模型试验结果分析

3.1 能量特性试验成果分析

根据装置模型试验结果,把不同叶片安放角度下的流量扬程曲线绘制在同一张图上,把相同效率点连成等效率曲线,把相同汽蚀余量点连成等汽蚀余量曲线,就得到了大套一站水泵装置通用性能曲线,如图 2 所示。从图 2 可以提到,水泵装置最高效率出现在 0° 叶片安放角,达到 77.50%,对应的流量和扬程分别为 304.10 L/s、5.16 m;在 -4° 叶片安放角下的装置最高效率值最低,仅为 74.90%,与 0° 叶片安放角下的装置最高效率相差 2.60%。

图 3 为根据大套一站水泵装置模型试验结果,按照水泵相似律和等效率换算后得到的大套一站原型水泵装置通用性能曲线。由于大套一站为灌排结合泵站,担负抗旱、排涝等任务,应满足灌溉和排涝两种设计工况下的流量要求,并具有较高的长期运行效率。从图 3 可以看到,以 0° 叶片安放角下的装置能量特性最优。在灌溉设计扬程 5.20 m 下的流量为 10.31 m³/s,对应的装置效率为 77.22%;在排涝设计扬程 4.80 m 下的流量为 10.31 m³/s,对应的

装置效率为 77.50%,说明优化水力设计后的大套一站水泵装置在灌溉和排涝两种工况下,都具有较好的能量特性;在叶片安放角 0° 时,两种工况下的单泵装置流量都大于 10 m³/s,能满足大套一站设计流量 50 m³/s 的要求。

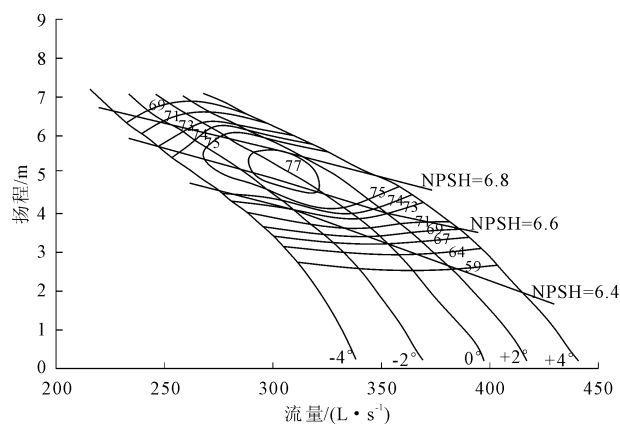


图 2 模型水泵装置通用性能曲线

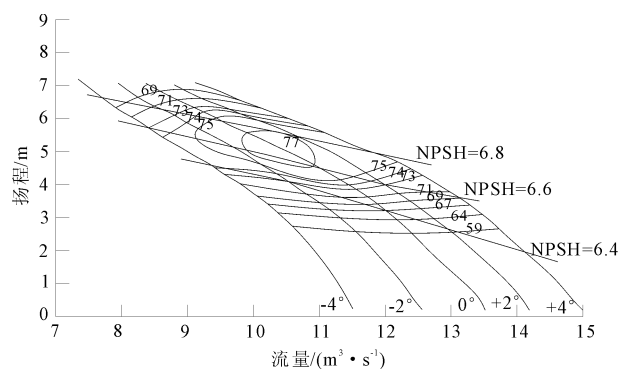


图 3 原型水泵装置通用性能曲线

3.2 汽蚀特性试验成果分析

不同叶片安放角和不同特征扬程下的装置临界汽蚀余量见图 2。由于采用等扬程模型试验方法,由汽蚀相似律可知,原、模型水泵装置的汽蚀余量相等。试验结果表明,当叶片安放角为 0° 时,在泵装置最高净扬程 6.8 m 处,临界汽蚀余量 $NPSH_r = 7.99$ m;在排涝期设计净扬程 5.2 m 处,临界汽蚀余量 $NPSH_r = 6.76$ m;在灌溉期设计净扬程 4.8 m 处,临界汽蚀余量 $NPSH_r = 6.54$ m。因此,大套一站水泵装置具有良好的汽蚀性能。

3.3 飞逸特性试验成果分析

通过大套一站模型水泵装置飞逸特性试验,得到了在不同扬程与不同叶片安放角度下的水泵装置飞逸转速(图 4)。根据相似理论可知,原、模型水泵装置的单位飞逸转速相等。表 1 为不同叶片安放角度下的模型泵装置单位飞逸转速计算结果。

从图 4 可以看到,大套一站水泵装置飞逸转速随叶片安放角和扬程的变化而变化。在同一扬程

下,随着叶片安放角的增大,飞逸转速均匀减小;叶片安放角保持不变时,飞逸转速随扬程的增加而增加。由表 1 可知,叶片角度为 0° 时,单位飞逸转速为 219.97 r/min ,而当水泵装置在最大扬程 6.8 m 运行时,如果停机时断流设施发生故障,最大飞逸转速达到 327.8 r/min ,超过 1.5 倍机组额定转速 321.5 r/min ,可能造成设备破坏。因此,大套一站水泵装置在设计和在 高扬程工况运行时,应采取一定的预防措施,防止飞逸事故的发生。

表 1 模型泵装置单位飞逸转速计算结果

叶片安放角度/ $^\circ$	-4	-2	0	+2	+4
单位飞逸转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	231.23	225.6	219.97	214.33	208.7

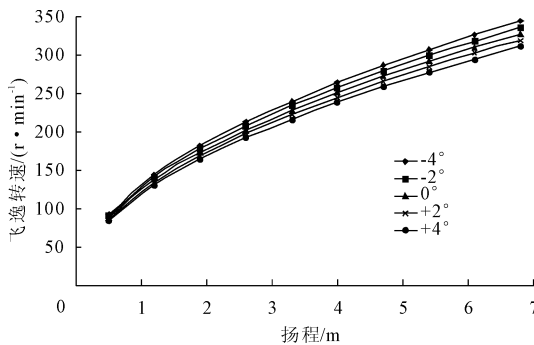


图 4 模型水泵装置飞逸特性曲线

4 结 语

在满足《泵站设计规范》的基本要求下,运用数

值计算方法,通过水力设计优化,改善了大套一站的水泵进水条件,减小了进出水流道的水力损失,为水泵装置安全、高效运行创造了条件。在 0° 叶片安放角下,对应于灌溉和排涝设计扬程,水泵装置效率分别达到 77.22% 和 77.50% ,流量满足设计要求,有较高的能量性能和良好的汽蚀性能。在泵站运行管理中,应采取适当的防飞逸措施,防止水泵装置在较高扬程事故停机时,飞逸转速对水泵机组的破坏作用。水泵装置优化设计的有效性和可靠性得到了模型试验结果的验证,为类似大中型泵站的设计积累了经验,为泵站的科学运行和管理提供了依据。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. GB/T50265-97. 泵站设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,北京,1997:10-20.
- [2] 张仁田,岳修斌,朱红耕,等. 基于 CFD 的泵装置性能预测方法比较[J]. 农业机械学报, 2011,42(3):85-90.
- [3] 朱红耕,袁寿其. 大型泵站进水流道技术改造优选设计[J]. 水力发电学报,2006,25(2):51-55.
- [4] 周济人,金 燕,刘 超. 大型泵站箱形进水流道内部流动数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2011,9(6):48-50,58.
- [5] 朱红耕. 大型泵站虹吸式出水流道水力特性分析[J]. 中国给水排水,2006,22(6):54-57.
- [6] 朱红耕,张仁田,邓东升,等. 大型水泵装置全流道数值模拟与性能预测[J]. 排灌机械,2008,26(3):46-50.
- [7] 吕赛军,费海蓉,戴龙洋,等. 大套一站水泵装置进水流道优化设计[J]. 南水北调与水利科技, 2011,9(1):33-35.

(上接第 46 页)

结果表明,这两种模型得到的坝体和防渗墙应力及变形计算结果差异很小,变化规律相同。因此,对类似土石坝,有限元计算时可以采用 8 结点等参单元,不会导致较大误差,并且更节省时间。

参考文献:

- [1] 汝乃华,牛运光. 大坝事故与安全:土石坝[M]. 中国水利水电出版社,2001.
- [2] 戴跃华,薛继乐. ANSYS 在土石坝有限元计算中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(4):74-76,86.
- [3] 沈新慧. 防渗墙及其周围土体的应力探讨[J]. 水利学报,1995,(11):39-45.
- [4] 朱俊高,殷宗泽. 高土石坝混凝土防渗墙弹塑性应力变形分析[J]. 水利学报,1997,(7):19-23.

- [5] 卢廷浩,汪荣大. 瀑布沟土石坝防渗墙应力变形分析[J]. 河海大学学报,1998,26(2):41-44.
- [6] 陈五一,施维成. 基岩断层错动对心墙堆石坝的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):578-583.
- [7] 高素荷,姚河省. 网格划分密度与有限元求解精度研究[C]//第三届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 大连:大连理工大学,480-485.
- [8] 李金娜. 有限元单元网格剖分对结构抗震反应分析的影响[J]. 水科学与工程技术,2009,(2):3-5.
- [9] 费 康,刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学,2010,31(3):881-890.
- [10] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.