

# 大型低扬程泵装置水力设计 关键技术的创新与发展

刘 军<sup>1</sup>, 施 伟<sup>1</sup>, 徐 磊<sup>2</sup>, 陆林广<sup>2</sup>

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029; 2. 扬州大学, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**我国低扬程泵站建设的水平经历了由低到高的发展过程,特别是南水北调东线一期工程的建设,促进低扬程泵站的关键技术取得了长足的进步;为进一步满足南水北调东线二期工程等重大工程大型低扬程泵站的需要,对南水北调东线一期工程低扬程泵装置水力设计的关键技术进行了较为系统的总结和提炼。结果表明:南水北调工程水泵模型及水泵装置同台测试为保障我国低扬程泵装置水力设计质量作出了重要贡献;大型低扬程泵装置的水泵选型新方法可保证低扬程泵站设计扬程工况位于泵装置高效运行区、最高扬程工况位于稳定运行区;采用分层次优化水力设计方法可以有效完成低扬程泵装置流道优化水力设计工作;立式低扬程泵装置宜优先采用肘形进水和虹吸式出水流道;对于特低扬程泵站宜优先应用前置竖井贯流式泵装置,可满足结构稳定和水力性能优异的要求;为实现泵站工程整体最优化设计,需要采用泵装置水力设计与泵房水工设计、结构设计之间的协同优化设计方法。

**关键词:**大型泵站;低扬程泵装置;水力设计;关键技术;创新与发展

中图分类号:TV675

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2021)12-0001-07

## Innovation and development of key technologies for hydraulic design of large-scale pump system with low head

LIU Jun<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, XU Lei<sup>2</sup>, LU Linguang<sup>2</sup>

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion, Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210029, China; 2. Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** The construction level of low head pump station in China has experienced a development process from low to high, especially the construction of the first phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project, which has made great progress in promoting key technologies of low head pump station. In order to further meet the needs of large-scale low head pump station of the second phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project, key hydraulic design techniques of the low head pump unit of the first phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project were systematically summarized and refined. The results showed that the water pump model of the South-to-North Water Transfer Project and the simultaneous testing of pump units had made important contributions to ensure the hydraulic design quality of low head pump units in China. The new method of pump selection for large low head pump unit could ensure that the design head condition of low head pump station located in efficient operation zone and the highest head condition located in stable operation zone. The

收稿日期:2021-07-16

基金项目:国家自然科学基金(51309200,51779215);江苏水利科技项目(2019015)

作者简介:刘军(1963—),男,研究员级高级工程师,主要从水利工程建设与管理方面的应用研究。E-mail:jsnsbdlj@si-

na.com

hierarchical optimization hydraulic design method could effectively complete the flow channel optimization hydraulic design of low head pump unit. Elbow inlet and siphon outlet were preferred for vertical low head pump devices. For ultra-low head pump station, it's advisable to apply pre-shaft tubular pump device, which could meet requirements of stable structure and excellent hydraulic performance. In order to realize the overall optimization design of pump station, collaborative optimization design method between hydraulic design of pump unit, hydraulic design and structural design of pump house should be adopted.

**Key words:** large-scale pump station; low head pump system; hydraulic design; key technology; innovation and development

随着全球异常及极端气候出现的增多和特大洪涝旱灾的频发,大型低扬程泵站在经济发达的平原地区所发挥的保障作用日益突出。预计今后数十年我国还将陆续建设一批大中型低扬程泵站,国家重点工程南水北调东线二期工程和淮河入海水道二期工程也将于近几年内开工建设。南水北调东线一期工程的高标准、高要求大大促进了大型低扬程泵装置关键技术发展的进程。为进一步提高江苏和全国大型低扬程泵站的泵装置水力设计水平和工程建设质量,满足我国南水北调东线二期等重大工程大型低扬程泵站建设的需要,有必要对南水北调东线一期工程低扬程泵装置水力设计的关键技术进行较为深入系统的总结与提炼。

## 1 南水北调工程水泵模型同台测试主要成果

为满足南水北调东线工程高标准建设的需要,水利部调水局于 2004 年组织开展了低扬程水泵模型的同台测试工作。水泵模型同台测试任务由中水北方勘测设计研究有限责任公司承担,该公司的水力机械试验台(以下简称“天津试验台”)按高标准建成了具有公正性、专业性和权威性的高精度试验台,为保证水泵同台测试的质量提供了必要的基础条件。

### 1.1 水泵模型同台测试主要成果

水泵模型同台测试工作于 2004 年 11 月 30 日向社会公开征集适用于南水北调东线工程的水泵模型,共有 27 个水泵模型参试,测试工作于 2005 年 1 月结束。南水北调工程轴流泵模型同台测试成果经专家评审后向社会公布,主要性能参数见文献[1]。同台测试资料表明:当时国内轴流泵水泵模型高效区效率的总体水平达到 84% 左右,最高点效率达到 86.7%<sup>[1]</sup>。

国内首次轴流泵模型同台测试是 1981 年在中国农机院进行的全国性的轴流泵模型同台测试,共

有 13 个轴流泵模型参试。测试结果表明,当时国内轴流泵水泵模型高效区效率平均为 81% 左右,最高点效率为 84.5%<sup>[2-3]</sup>。

南水北调东、中线一期工程除采用进口水泵的泵站外,全部采用了南水北调工程水泵模型同台测试成果,近十多年来国内其他大中型低扬程泵站也都普遍采用了水泵模型同台测试成果。

### 1.2 水泵装置模型同台测试主要成果

从 2005 年起,南水北调工程和国内其他重要工程的一批大型低扬程泵站的泵装置模型在天津试验台进行了严格测试,得到了不同型式低扬程泵装置模型的主要性能参数,为客观评价低扬程泵装置的水力性能提供了可靠依据。表 1 列出了 2005—2018 年经天津试验台测试的 4 种型式低扬程泵装置最高效率的统计结果。

表 1 低扬程泵装置模型效率试验结果汇总(天津台)

泵装置型式	泵装置模型最高效率/(%)		
	最高	最低	平均
立式轴流泵装置	79.4	75.9	77.9
导叶式混流泵装置	85.1	81.7	83.5
竖井式贯流泵装置	83.7	79.5	81.2
斜式轴伸泵装置	81.0	80.1	80.6

## 2 大型低扬程泵装置水泵选型新方法

大型低扬程泵装置的水泵选型长期采用传统的求水泵模型测试段性能曲线与泵装置需要扬程曲线交点的方法<sup>[4-5]</sup>,工程实践表明这种方法常导致水泵装置高效区的扬程高于设计工况点。根据对大型低扬程泵装置与相应水泵模型测试段性能曲线分析比较的结果<sup>[6]</sup>,提出了大型低扬程泵装置水泵选型新方法,针对单泵设计流量和特征扬程,选择合适的水泵模型、调整叶轮直径  $D$  及转速  $n$ ,使

其满足以下要求:①泵装置设计工况点尽可能位于水泵模型测试段性能曲线的高效区;②泵装置设计工况点所在的叶片角度位于水泵模型测试段性能曲线高效区的左侧 $3^{\circ}$ 左右;③泵装置最高扬程低于水泵模型测试段性能曲线的第一鞍底扬程以下。

### 3 低扬程泵装置流道优化水力设计方法

进、出水流道的优化水力设计方法是大型低扬程泵装置的关键技术之一,在南水北调一期工程及其他工程的数十座大型低扬程泵站中得到了成功应用,为提高我国低扬程泵装置水力设计水平作出了重要贡献。经过近30年的发展,建立了基于CFD的低扬程泵装置进、出水流道优化水力设计方法,内容包括:进、出水流道三维形体过流面优化水力设计的目标函数、约束条件和决策变量,立式泵装置的肘形进水流道、虹吸式出水流道和前置竖井式贯流泵装置的进、出水流道空间形体参数化设计的数学模型,基于决策变量类型的分层次优化的进、出水流道三维形体过流面的设计方法,流道水力性能模型试验验证<sup>[7-8]</sup>。影响大型低扬程泵站进、出水流道几何型体的几何变量比较多,这些变量不同值的组合所形成的流道型体优化计算方案将非常之多。为避免遭遇优化计算时的“维数灾”,提出了分层次优化水力设计方法,将流道优化水力设计分为4个层次:①充分利用已积累的流道优化水力设计的资料、数据及经验等,针对泵站的具体情况拟定质量较高的流道设计初步方案;②经过对不同决策变量组合的进、出水流道过流面性能的大量数值计算,揭示各个主要决策变量影响进、出水流道过流面水力性能的变化趋势和基本规律;③进行流道次要变量的优化计算;④进行流道型线的优化计算。进、出水流道的控制参数、次要几何参数和流道型线的优化计算需要经过多次重复的过程才能取得令人满意的结果。

### 4 立式低扬程泵装置主要研究成果及应用

立式泵装置具有技术成熟、安装方便、运行稳定、可靠性高和投资省、维护费用少等突出优点,已在数百座低扬程泵站中得到十分广泛的应用。立式泵装置应用于低扬程泵站的主要困难有:①泵装置在立面方向的布置尺寸较为紧张;②进水流道和出水流道均需作 $90^{\circ}$ 转向,流道水头损失相对较大。

#### 4.1 立式泵装置的流道型式

##### 4.1.1 进水流道的主要型式及特点

与低扬程立式泵装置配套使用的主要有肘形、簸箕形和钟形等3种型式的进水流道。这3种型式进水流道型体的特点为:肘形进水流道型体的变化连续流畅,簸箕形和钟形进水流道均由吸水箱和喇叭管2个部分组成;肘形进水流道高度较大、宽度较小,钟形进水流道高度较小、宽度较大,簸箕形进水流道对高度和宽度的要求介于肘形和钟形进水流道之间。3种型式进水流道的流场图见图1,从图1可以看到:

(1)肘形进水流道内流态平顺,水流作 $90^{\circ}$ 转向中未产生脱流,经流道圆锥段调整,流道出口处水流趋向于均匀分布和垂直于出口断面。

(2)钟形进水流道内的流动分为2个阶段:第1阶段是水流在吸水箱内的汇集阶段,水流从四周进入喇叭管;第2阶段是水流在喇叭管内的整流阶段,水流在喇叭管内急剧加速,流场得到较快调整。流道侧后部的水流方向变化和流速梯度较大,易产生旋涡,若旋涡强度达到一定程度产生附壁涡带将影响到水泵的稳定工作。

(3)簸箕形进水流道的基本流动形态与钟形进水流道大体相同,也分为2个阶段,但其尾部底面旋涡运动较弱,旋转强度小,基本不会导致附壁涡带的产生。

研究表明,肘形进水流道是大型泵站立式泵装置中水力性能最好的流道型式。经过多年研究开发和工程应用,肘形进水流道已发展成为成熟的进水流道型式。南水北调东线一期工程采用立式泵装置的14座新建大型泵站全都采用了肘形进水流道(表2)。国内近10年建设的其他工程采用立式泵装置的大中型泵站也都应用了肘形进水流道。

##### 4.1.2 出水流道的主要型式及特点

应用于立式低扬程泵装置的出水流道主要有虹吸式出水流道和低驼峰式出水流道(表2),其流道流场图见图2。

虹吸式出水流道几何型体比较复杂,但水力性能优异、断流方式简单可靠。虹吸式出水流道进口转弯段和上升段内的水流扩散平缓无脱流现象,受水流惯性和环量的双重影响,顺水流方向看主流偏于流道下降段的左侧上部,流道右侧下部区域易出现局部旋涡。

低驼峰式出水流道特点是流道先平缓地向上

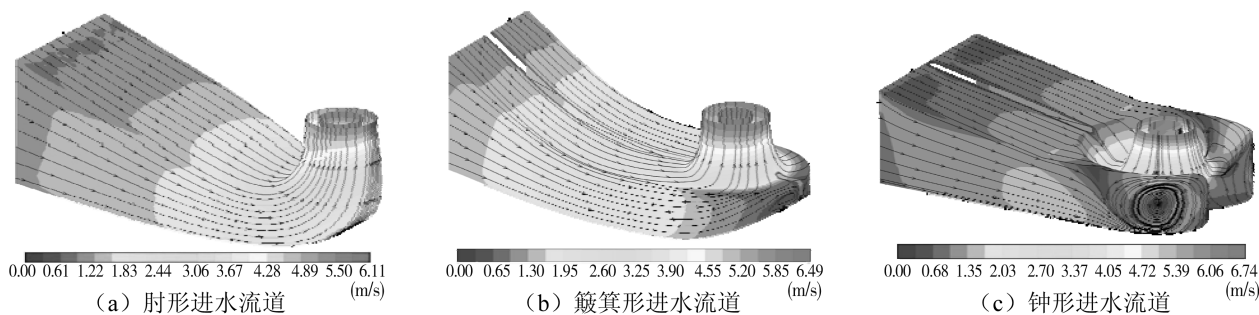


图 1 立式泵装置 3 种型式进水流动的流场图

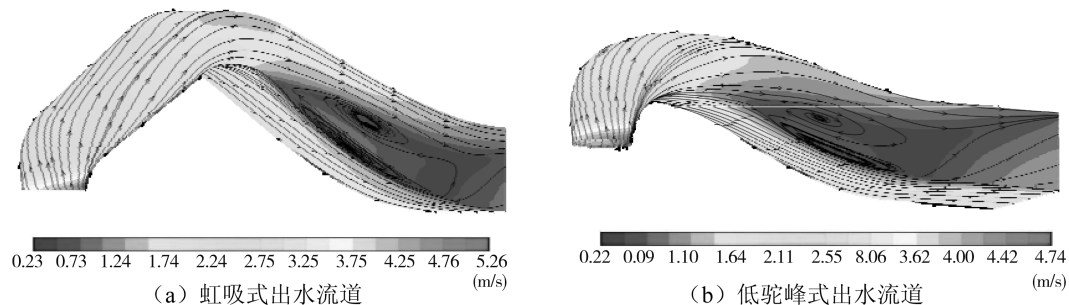


图 2 立式泵装置 2 种型式出水流动的流场图

表 2 南水北调东线一期工程 14 座泵站立式泵装置水力性能主要参数

泵站名称	进水 流道 型式	出水 流道 型式	单泵 设计 流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	叶轮 直径/ m	水泵 转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	nD 值	扬程/m		泵装置模型试验结果						装置模型 试验单位
									泵装置 效率/%		最优 效率/ %	临界汽蚀 余量/m			
							设计	平均	设计	平均		设计	平均		
万年闸站	肘形	低驼峰	31.5	3.15	125	393.8	5.49	5.49	75.0	75.0	77.7	6.60	6.60	中水北方	
解台站	肘形	低驼峰	31.5	2.90	150	435	5.84	5.45	74.0	73.5	74.3	8.33	8.06	河海大学	
刘山站	肘形	低驼峰	31.5	2.90	150	435	5.73	3.67	75.0	70.8	76.1	8.37	7.16	河海大学	
淮安四站	肘形	低驼峰	33.4	2.90	150	435	4.18	4.05	73.4	72.5	76.2	7.83	7.70	河海大学	
台儿庄站	肘形	低驼峰	31.25	2.95	136.4	402	4.53	3.73	74.7	71.7	76.2	4.33	3.74	扬州大学	
长沟站	肘形	低驼峰	33.5	3.15	125	393.8	3.86	3.66	78.5	78.5	79.0	6.94	6.75	中水北方	
八里湾站	肘形	低驼峰	33.4	3.15	116.4	384.1	4.78	4.15	78.8	76.9	79.4	6.32	6.15	中水北方	
皂河二站	肘形	虹吸式	25.0	2.70	150	405	4.70	4.60	76.3	76.5	78.2	6.64	6.47	河海大学	
宝应站	肘形	虹吸式	33.4	2.95	125	369	7.60	7.19	80.8	79.9	81.4	9.40	8.75	扬州大学	
邓楼站	肘形	虹吸式	33.5	3.15	125	393.8	3.57	3.57	77.2	77.2	78.5	6.67	6.67	中水北方	
刘老涧二站	肘形	虹吸式	29.5	3.00	125	375	3.70	3.40	75.0	75.0	76.5	6.90	6.73	河海大学	
泗阳站	肘形	虹吸式	33.0	3.15	125	393.8	6.30	5.55	77.4	78.5	79.3	6.78	6.14	河海大学	
洪泽站	肘形	虹吸式	37.5	3.15	125	393.8	6.00	5.54	79.5	77.6	81.7	7.90	7.74	中水北方	
睢宁二站	肘形	虹吸式	23.0	2.60	150	390	8.30	7.80	83.5	83.5	83.9	7.09	6.92	中水北方	

弯曲,形成一个较低的驼峰然后再向下弯曲,以尽可能加大流道的转弯半径,使流道内的水流较为平缓地转向,减轻水流急转造成的脱流,从而减少流道的水头损失。低驼峰式出水流道转弯段水流转向有序、扩散平缓,但在流道下降段,受水流惯性和环量的双重影响,顺水流方向看主流偏于流道左侧上部,流道右侧下部区域出现局部旋涡。

#### 4.2 立式泵装置在南水北调东线一期工程的应用

南水北调东线一期工程 14 座新建大型座泵站采用了立式低扬程泵装置,14 座泵站立式泵装置主要参数及模型试验主要结果列于表 2。

根据统计结果,南水北调东线一期工程开工建设前(2002 年以前),我国立式低扬程泵装置效率的整体水平为 70% 左右。根据表 2 列出的泵装置模型试验结果,可算得南水北调东线一期工程 14 座泵站立式泵装置最优工况点效率的平均值为 78.3%。与南水北调东线一期工程开工前的平均水平相比,我国立式低扬程泵装置效率的整体水平提高了约 8%。

#### 4.3 建议推广应用的立式低扬程泵装置进、出水流道

在南水北调东线一期工程 14 座采用立式泵装置的泵站中,采用虹吸式出水流道和低驼峰式出水流道的泵站各 7 座。根据表 2 所列泵装置模型试验结果,采用虹吸式出水流道 7 座泵站的泵装置最优工况效率的平均值为 79.9%,采用低驼峰式出水流道 7 座泵站的泵装置最优工况效率的平均值为 77.0%。

中水北方勘测设计研究有限责任公司受南水北调工程专家委员会的委托,于 2018 年 12 月对采用虹吸式出水流道的南水北调东线一期工程邓楼站进行了现场测试。结果表明:邓楼站水泵机组的启动和停机过程迅速、平稳,真空破坏阀在水泵机组启、停机过程中发挥了关键作用,达到预定要求;该站泵装置效率基本达到模型试验的指标<sup>[9]</sup>。

大型低扬程泵装置多年运行、管理的工程实践证明:虹吸式出水流道采用真空破坏阀断流,不仅结构简单、操作方便、可靠性高,而且日常维护工作量很少<sup>[10-11]</sup>;低驼峰式出水流道采用液控快速闸门断流,不仅操作系统复杂、运行管理技术要求高,而且维护工作量大,特别是液压油缸的油封常需更换<sup>[11]</sup>。

大量低扬程泵站工程研究和实践成果表明:肘形进水流道和虹吸式出水流道是大型泵站立式泵

装置的最佳流道型式。对于虹吸式出水流道不能直接挡洪的泵站,可在出水流道出口设置挡洪闸门。

### 5 前置竖井式贯流泵装置主要研究成果及应用

贯流泵装置最主要的特征是采用卧式轴系,驱动电机的掩体(灯泡体或竖井)布置于流道内,水泵机组的主轴无需从流道穿出,因此贯流泵装置的进、出水流道顺直贯通不弯曲,流道水头损失小。对于扬程在 3m 以下的特低扬程泵站,采用贯流泵装置可获得相对较高的流道效率和泵装置效率,特别适用于年运行时数多的大流量特低扬程泵站。

#### 5.1 前置竖井式贯流泵装置特点

前置竖井式贯流泵装置的竖井布置在进水流道内,驱动电机设置在竖井内,其结构方面的优点主要体现为:①水泵叶轮采用简支式轴系,结构稳定;②在水泵轴封与导轴承之间设有隔水腔,轴封渗漏水可通过布置在导叶体叶片内的排水管排出;③竖井为钢筋混凝土结构,并与泵站底板浇筑为一体,整体稳定性特别好。

对前置竖井式贯流泵装置进行优化水力设计的要点为:①采用成熟的优秀水泵模型;②对进、出水流道(包括竖井外壁)的型线进行优化水力设计,设计流量时的流道水头损失控制在 0.2m 以内。经过优化设计计算的前置竖井式贯流泵装置的流场图见图 3。可以看到,进入进水流道的水流从竖井两侧通过,在竖井尾部汇合调整后进入水泵,流道内的水流收缩平顺、流速变化均匀,流线层次分明;导叶体出口水流旋转进入出水流道,出水流道内的水流扩散平缓、流速变化均匀,流道内无任何不良流态。

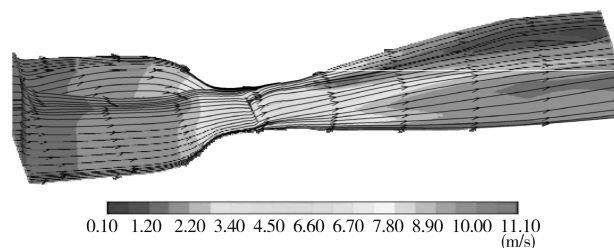


图 3 前置竖井式贯流泵装置流场图

#### 5.2 前置竖井式贯流泵装置的应用

南水北调东线一期工程的邳州站采用了我国自主研发的前置竖井式贯流泵装置,蔺家坝站、金湖站、淮阴三站、韩庄站、二级坝站、泗洪站等 6 座泵站采用了全套进口的后置灯泡式贯流泵装置。

表 3 列出了这 7 座泵站贯流泵装置模型试验的主要性能参数统计表。

前置竖井式贯流泵装置的水力性能优异,且具有结构简单、安装检修方便、造价低等突出优点,自成功应用于邳州站以来已在 50 余座大流量低扬程泵站得到应用<sup>[12]</sup>。邳州站前置竖井式贯流泵单机组稳定运行已超过 10 000 h。

为支撑、以泵房结构为依托、以泵站水工建筑物为基础的复杂系统。泵装置水力设计与泵房水工设计、结构设计之间存在着相互依存、相互制约的复杂关系。

泵装置流道的控制尺寸对流道的水力性能和泵站的土建工程量都有较大影响。如:对进水流道而言,流道平面方向较小的收缩角有利于水流的均

表 3 南水北调东线一期工程贯流泵装置模型试验的主要性能参数

泵站名称	贯流泵装置型式	单机设计流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	水泵叶轮直径/ m	水泵转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	nD 值	扬程/m	泵装置模型试验结果		试验单位
						设计/平均	泵装置效率/%	临界空化余量/m	
							设计/平均	设计/平均	
蔺家坝站	后置灯泡式	25.00	2.85	120.0	342.0	2.40/2.08	78.3/75.9	3.51/3.51	日本日立
金湖站	后置灯泡式	37.50	3.35	115.0	385.3	2.45/2.10	80.7/78.1	4.40/4.40	
淮阴三站	后置灯泡式	33.40	3.14	125.0	392.5	4.28/3.06	79.3/77.5	9.60/6.80	荷兰耐荷
韩庄站	后置灯泡式	31.25	3.14	125.0	392.5	4.15/3.65	83.0/82.6	9.10/8.20	
二级坝站	后置灯泡式	31.25	3.01	115.4	346.8	3.21/1.99	82.8/77.8	5.00/4.50	日本荏原
泗洪站	后置灯泡式	30.00	3.05	107.1	326.7	3.23/1.60	81.0/78.5	6.40/4.50	
邳州站	前置竖井式	33.50	3.30	108.0	356.4	3.10/2.70	83.1/83.0	4.86/4.67	中水北方

### 5.3 特大型贯流泵装置的研发

对贯流泵装置的研究及应用有两方面的刚性要求:①结构合理,稳定性好;②进、出水流态好,水力性能优异。贯流泵装置优化设计研究的总目标是在结构设计和水力设计两个方面达到完美统一。南水北调二期工程计划开始之初,面对特大型贯流泵装置的工程应用需求,尚存以下问题:①未对成套进口的后置灯泡式贯流泵装置在消化吸收的基础上创新发展;②南水北调东线一期工程 6 座泵站 3 家国外水泵供货商提供的后置贯流泵装置没有进行过第三方同台测试。为了确保特大型贯流泵装置安全稳定和高效运行,中水淮河规划设计研究有限责任公司及时提出了对特大型贯流泵装置进行深入研究的问题,对促进我国特大型贯流泵装置的发展具有深远意义。

## 6 泵站水力设计与水工设计、结构设计的协同优化

### 6.1 大流量泵站协同优化设计的新理念

大流量泵站是以抽水装置为核心、以泵组结构

匀收缩,但在流道进口宽度和水泵叶轮直径一定的条件下,较小的收缩角需要较长的流道长度;对于立式泵装置的进水流道,较大的流道高度有利于水流的有序转向和流场调整,但较大的流道高度需要较大的开挖深度。再如:对出水流道而言,若要求尽可能多地回收流道出口水流的动能,就需要有较大的流道出口断面尺寸;同时,为了控制流道扩散角在一定范围内,以保证水流平缓扩散而不致因扩散过快而产生脱流及旋涡,需要有一定的流道长度。水力性能优异的流道一般要求有较为宽松的流道控制尺寸,对于年运行时间较长的泵站,宜适当放宽流道控制尺寸;对于年运行时间较少的排涝泵站,常更多考虑投资问题。

提高低扬程泵装置水力性能的途径有好多种,其中,处理好提高流道水力性能与泵站工程设计之间的关系是极其重要的一个方面。在泵装置流道优化水力设计过程中,需要与承担泵站工程设计任务的设计院进行充分的交流和磋商,兼顾工程投资、泵房结构设计和流道水力性能等多方面的要求,提出合理调整流道控制尺寸和泵房布置的

建议。

为实现泵站工程整体最优化设计,提出了以水泵机组安全稳定和高效运行为总体目标,进行泵装置水力设计与泵房水工设计、结构设计之间的协同优化设计的新理念。

## 6.2 借助于互相关决策变量解决协同优化问题

为便于进行泵装置水力设计与泵房水工设计、结构设计之间的协同优化设计,在流道水力设计决策变量和泵房水工设计决策变量的基础上,引入了新的综合性的决策变量——对泵装置水力设计和泵房水工设计、结构设计都有较大影响的互相关决策变量。互相关决策变量比较多且对流道水力性能的影响规律不同,为便于指导各设计单元之间的协同优化,有必要研究这些互相关决策变量影响流道水力性能的基本规律。互相关决策变量比较多,限于篇幅,此处仅以立式泵装置水泵叶轮中心高程和前置竖井式贯流泵装置叶轮直径为例进行简要说明。

### (1) 立式泵装置水泵叶轮中心高程的影响

在低扬程泵站进、出水池水位一定的条件下,立式泵装置的水泵叶轮中心高程对泵房立面方向的布置(包括泵房底板高程、水泵顶盖高程、水泵梁高程、电机梁高程,等)影响很大,对泵装置进、出水流道水头损失的影响也很大。

### (2) 前置竖井式贯流泵装置叶轮直径的影响

前置竖井式贯流泵装置叶轮直径对泵房布置(包括进水流道的长度、宽度,出水流道的长度、宽度,等)影响很大;水泵叶轮直径直接影响到其进水流道的收缩角和出水流道的扩散角(图4)。在设计流量一定的条件下,叶轮直径愈大,进水流道的收缩角愈小、出水流道的扩散角也愈小,愈有利于改善进、出水流态和减少流道水头损失;但叶轮直径愈大,泵站的设备投资愈大。

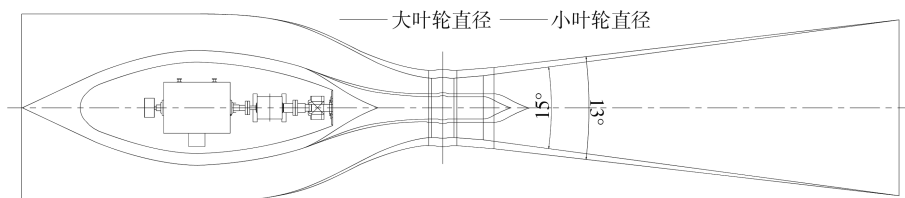


图4 不同叶轮直径前置竖井式贯流泵装置对比

对于互相关决策变量的研究,一般是根据设计院的要求和泵站的具体情况有针对性地进行,掌握最重要互相关决策变量的基本规律,为合理调整互相关决策变量提供依据。在此过程中,需与设计院

进行充分的交流协调,确定互相关决策变量调整的最佳方案,力争实现泵装置水力设计与泵房水工设计、结构设计之间的协同优化。

## 6.3 流道优化水力设计工作的时间安排

大型泵站的建设过程一般需要经历项目建议书、可研、初步设计和招投标、施工等不同的阶段。为便于实现泵装置水力设计和泵站工程设计的协调和同步优化,最好能在初步设计阶段的初期就能启动流道优化水力设计。因为流道设计尺寸的改动可能涉及很多张图纸,牵一发而动全身。如果在初步设计后期或水泵设备招投标阶段才开始安排进行泵装置优化水力设计工作,此时泵房水工设计、结构设计工作已基本完成,甚至已开始绘制施工图,在这种情况下进行协同优化,则很有可能导致过大的工程图纸修改工作量,有时还会遇到投资和施工方面的困难,一般很难取得好的效果。

## 7 结 语

我国低扬程泵站的发展已经走完差不多一个甲子的历程,是世界上低扬程泵站总装机容量最多的国家。南水北调东线一期工程的建设促进了低扬程泵站的关键技术取得了长足的进步,但低扬程泵站还有些关键技术有待进一步研发与提高,如:特大型贯流泵装置的优化设计,流道现场施工对过流面型线的误差控制,泵站现场测试与分析研究等。南水北调东线二期工程的建设即将开始,我国水泵行业将在技术方面逐步跟上水轮机行业的步伐,相信我国大型低扬程泵站的技术将进入一个新的发展阶段。

## 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] 田家山,钟付维. 国内、外大型排、灌泵站的建设动态和发展趋势[J]. 水电科学进展,1981(4):15-27.
- [3] 关醒凡,袁寿其,张建华,等. 轴流泵系列水力模型试验研究报告[J]. 水泵技术,2004(3):3-8.

(下转第14页)

断时间不能超过 3 s,届时无论故障报警信号是否消除均应合上。若接地出现在某一回路,有环路的先解环,再采用取熔丝和拆端子的方法,直至找到故障位置并解决。

## 5 总 结

双向流道泵站运行水位常常变化较大,死水区的存在导致了回流的发生,这是诱发不良压力脉动、汽蚀等水力故障的重要原因。双向流道型式的特点往往导致泵轴过长,流道水流脉动压强差更容易引发泵轴振摆,导致机组振动,发生机械故障。直流系统失电、绝缘不良等引发电气故障。故障发生时应根据其类型和特点进行解决和预防,在日常运行中注意对泵站进行维护和检修,减少泵站水力故障、机械故障和电气故障的发生频率。很多故障都是由于流道设计、水泵选型、安装不合理引起的,设计人员应根据实际情况选择合理的流道和水泵型式,这对减少故障的发生至关重要;制造人员应提高主机泵结构设计、加工制造工艺,生产合格优质的产品部件;泵站工作人员应结合工程实际不断学习、探索和实践,加强巡视和管理,及时将泵站故障隐患消灭在萌芽状态。

### 参考文献:

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版

社, 2009.

- [2] 戴立明. 双向流道泵站的特点分析[J]. 江苏水利, 1999(7):33-34.
- [3] 张鹏, 王麦琪, 李彦军, 等. 大型双向流道泵装置优化与试验研究[J]. 江苏水利, 2017(7):28-32.
- [4] 刘超, 金燕, 周济人, 等. 箱型双向流道轴流泵装置内部流动的数值模拟和试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5):192-198.
- [5] 傅宗甫, 严忠民, 周春天, 等. 双向流道模型脉动压力测试及其特性[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 88-91.
- [6] 焦伟轩, 成立, 颜红勤, 等. 超低扬程双向流道泵装置压力脉动特性研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(6):101-112.
- [7] 郝春明, 万继芳, 黄季艳. 常熟水利枢纽泵站水泵典型故障分析与改造[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3):44-47.
- [8] 赵翠萍, 王霞, 张雪峰. 高港枢纽轴流泵叶片调节机构的改进[J]. 科技传播, 2011(24):37, 40.
- [9] 杨继松. 谏壁抽水站闸门液压启闭系统技改研究[J]. 科技创新导报, 2010(34):28-29.
- [10] 蔡亚琴, 钱华清, 陈擎环. 浅析高港泵站直流系统的运行维护及故障处理[J]. 科技创新导报, 2014, 11(18):70.
- [11] 罗仕宏, 朱华明, 刘朝福, 等. 大型双向 X 型流道泵站机组减振技术研究[J]. 排灌机械, 2001(4):15-20.

(上接第 7 页)

- [4] 鄢碧鹏, 汤方平, 刘超. 水泵选型方法的研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 1999, 2(3):59-61.
- [5] 刘竹溪, 刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京:水利水电出版社, 2009.
- [6] 陆林广. 高性能低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [7] 陆林广, 祝婕, 冷豫, 等. 泵站进水流道模型水力损失的测试[J]. 排灌机械, 2005, 23(4):14-17.
- [8] 陆林广, 吴开平, 冷豫, 等. 泵站出水流道模型水力损失的测试[J]. 排灌机械, 2005, 23(5):23-26.
- [9] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 南水北调东线

一期工程轴流泵站效率、机组运行稳定性示范研究与评价[R]. 天津:中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2019.

- [10] 王岩, 邵羽中, 叶奎成. 泗阳第二抽水站真空破坏阀改造[J]. 中国农村水利水电, 2010(5):147-148.
- [11] 朱佳佳, 刘斌. 大型泵站常用断流方式分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(1):186-188.
- [12] 刘军, 施伟, 陆林广, 等. 前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化可行性研究[J]. 江苏水利, 2019(11):1-8.