

# 前置竖井式贯流泵装置水力设计 标准化可行性研究

刘 军<sup>1</sup>, 施 伟<sup>1</sup>, 陆林广<sup>2</sup>, 徐 磊<sup>2</sup>, 周歆宇<sup>2</sup>, 孙世宏<sup>2</sup>

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019;

2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**前置竖井式贯流泵装置具有水力性能优异、结构简单、电机通风散热条件较好、安装检修较方便和投资较少等优点,近10年来已在低扬程泵站得到十分广泛的应用。为保证前置竖井式贯流泵装置水力设计水平和提高泵站建设质量,提出对前置竖井式贯流泵装置水力设计进行标准化研究。分析了前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的有利条件:(1)前置竖井式贯流泵装置进水流道、竖井和出水流道主要控制尺寸相对值的离散性较小;(2)与前置竖井式贯流泵装置配套应用的4种水泵模型主要尺寸相同;(3)基于CFD的低扬程泵装置进、出水流道优化水力设计理论及方法已较为成熟。因此,对前置竖井式贯流泵装置进行水力设计标准化是可行的。

**关键词:**前置竖井式贯流泵装置;水力设计;标准化;可行性

中图分类号:TV675 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2019)11-0001-08

## Feasibility study on standardization of hydraulic design for front – positioned shaft tubular pump device

LIU Jun<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, LU Linguang<sup>2</sup>, XU Lei<sup>2</sup>, ZHOU Xinyu<sup>2</sup>, SUN Shihong<sup>2</sup>

(1. *The Eastern Route of South – to – North Water Diversion Project Jiangsu Water Source*

*Co. , Ltd. , Nanjing 210019, Jiangsu; 2. School of Hydraulic Science and Engineering,*

*Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu)*

**Abstract:** The front – positioned shaft tubular pump device has the advantages of excellent hydraulic performance, the simpler structure, the better motor ventilation and heat dissipation conditions, convenient installation and maintenance, and less investment, etc. It has been widely used in low – lift pumping stations in the past 10 years. In order to ensure the level of hydraulic design and improve the quality of pump station construction, the standardization research on hydraulic design of front – positioned shaft tubular pump device is proposed. The favorable conditions for standardization of hydraulic design for the pump device are analyzed as follows: (1) The dispersion of the main control sizes of the inlet passage, shaft and outlet passage is relatively small; (2) The main dimensions of the four kinds of pump model that are used with the pump device are homogeneous; (3) The theory and method of optimal hydraulic design of inlet and outlet passage for low – lift pump device based on CFD have been more mature. Therefore, it is feasible to standardize the hydraulic design of front – positioned shaft tubular pump.

**Key words:** front – positioned shaft tubular pump device; hydraulic design; standardization; feasibility

收稿日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51309200,51779215),江苏水利科技项目(2017032)

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研究。

## 1 低扬程泵装置型式的研发进展

从 20 世纪 80 年代开始,为适应我国面广量大的低扬程泵站建设的需要,特别是为了满足南水北调东线工程大型泵站建设的需要,对各种型式的低扬程泵装置进行了大量的研究工作<sup>[1-4]</sup>。工程界对我国最为适用的低扬程泵装置型式的认识、研发和应用,经历了从卧式轴伸泵装置(图 1)、斜式轴伸泵装置(图 2)、后置灯泡式贯流泵装置(图 3)到前置竖井式贯流泵装置(图 4)的发展过程。前 3 种型式的泵装置在一些大型泵站得到了应用,但后来发现这些泵装置还存在种种缺陷和不能令人满意之处,其工程应用受到了很大限制。



图 1 卧式轴伸泵装置



图 2 斜式轴伸泵装置

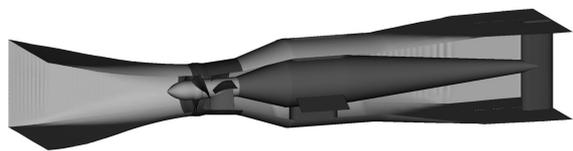


图 3 后置灯泡式贯流泵装置

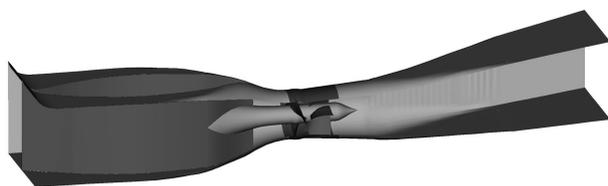


图 4 前置竖井式贯流泵装置

从 2007 年起,南水北调东线江苏水源有限责任公司与扬州大学合作,对前置竖井式贯流泵装置进行了深入细致的优化水力设计和模型试验研究,取得了重要突破。邳州站泵装置模型试验结果表明:前置贯流泵装置水力性能优异,改变了人们过去对灯泡式和竖井式贯流泵装置的认识(表 1)。2011 年,前置竖井式贯流泵装置率先在南水北调东线一期工程的大型低扬程泵站邳州泵站得到成功应用<sup>[5]</sup>。

南水北调东线一期工程邳州站设计输水量  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,单机设计流量  $33.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程和平均扬程分别为  $3.1 \text{ m}$  和  $2.7 \text{ m}$ ,选用 4 台前置竖井式贯流泵装置,水泵模型型号为南水北调同台测试的 TJ04-ZL-06<sup>[6]</sup>,原型泵叶轮直径和转速分别为  $3.3 \text{ m}$  和  $108 \text{ r}/\text{min}$ ( $nD=356.4$ )。该站经过优化水力设计的前置竖井式贯流泵装置单线图示于图 5,设计流量时的泵装置流场图示于图 6。

由图 6 可以看到前置竖井式贯流泵装置内水流流动的特点:(1)进水流道竖井段,水流在立面方

向和平面方向收缩平缓、均匀;在进水流道出口段,水流收缩加快,但依然保持流速匀称分布、流线层次分明;在流道出口断面,水流以垂直于该断面的方向均匀流出;进水流道水流收缩均匀、水力性能优异、水头损失小,完全满足低扬程泵装置稳定、高效运行所要求的进水流态;(2)在泵段内,水流在水泵叶轮的旋转作用下获得能量,水流以较大的切向速度流入导叶体内;在导叶片和导叶体扩散的共同作用下,回收一部分切向动能,但还有一定的剩余环量;(3)在出水流道内,受导叶体出口环量的影响,水流以螺旋状流入出水流道,其旋转运动从流道进口一直保持到流道出口,在旋转状态下流畅地完成扩散过程;在旋转水流所具有的离心力作用

下,流道断面四周的流速大于流道断面中心的流速,流道内未出现旋涡等不良流态;水流在整个出水流道内的扩散均匀平缓、水头损失小、水力性能优异,充分满足低扬程泵装置稳定、高效运行的要求。

经过优化的邳州站前置竖井式贯流泵装置于 2010 年在中水北方勘测设计研究有限责任公司的水力模型通用试验台进行了泵装置模型试验<sup>[7]</sup>,所得到的泵装置模型综合性能曲线示于图 7。可以看到:泵装置最优工况点效率达到了  $83.72\%$ ,设计扬程和平均扬程工况点的泵装置效率分别为  $83.11\%$  和  $83.02\%$ ,临界空化余量分别为  $4.86 \text{ m}$  和  $4.67 \text{ m}$ ,水力性能十分优异。

邳州站建成后,南水北调东线江苏水源有限责任公司对邳州站进行了试运行验收,并进行了机组性能现场测试。测试结果表明:邳州站水泵机组运行平稳,电气测量、监视、控制和保护等设备动作正常;泵装置水力性能优异,实测结果与模型试验结果基本一致;主站身、上下羽翼墙未出现异常现象,

表 1 竖井式贯流泵装置与灯泡式贯流泵装置模型试验主要结果的比较

泵站名称	贯流泵装置型式	设计流量 (m <sup>3</sup> /s)	叶轮直径 (m)	水泵转速 (rpm)	nD 值	扬程 (m)		泵装置模型试验结果		装置模型试验单位
						设计/平均	设计/平均	泵装置效率 (%)	临界空化余量 (m)	
蔺家坝站	灯泡式	25.0	2.85	120	342	2.40 / 2.08	78.3 / 75.9	3.51 / 3.51	日本日立	
金湖站	灯泡式	37.5	3.35	115	385.25	2.45 / 2.10	80.7 / 78.1	4.40 / 4.40		
淮阴三站	灯泡式	33.4	3.14	125	392.5	4.28 / 3.06	79.3 / 77.5	9.60 / 6.80	荷兰耐荷	
韩庄站	灯泡式	31.25	3.14	125	392.5	4.15 / 3.65	83.0 / 82.6	9.10 / 8.20		
二级坝站	灯泡式	31.25	3.005	115.4	346.78	3.21 / 1.99	82.8 / 77.8	5.00 / 4.50	日本荏原	
泗洪站	灯泡式	30.0	3.05	107.1	326.66	3.23 / 1.60	81.0 / 78.5	6.40 / 4.50		
邳州站	竖井式	33.5	3.30	108	356.4	3.10 / 2.70	83.1 / 83.0	4.86 / 4.67	中水北方	

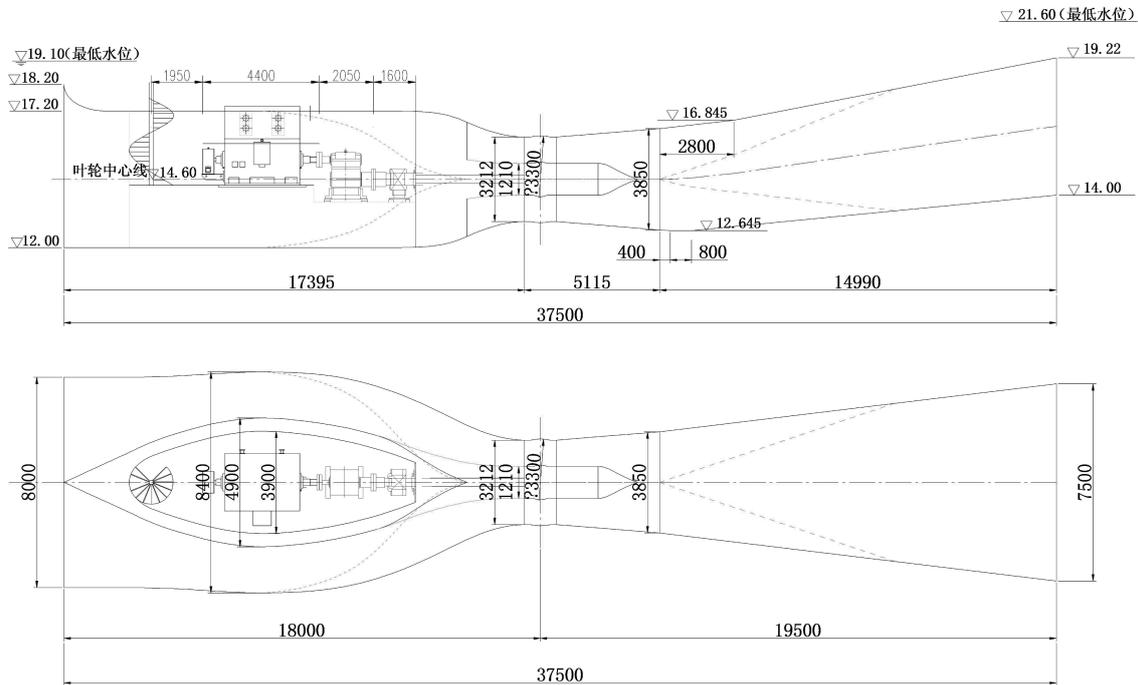


图 5 邳州站前置竖井式贯流泵装置单线图

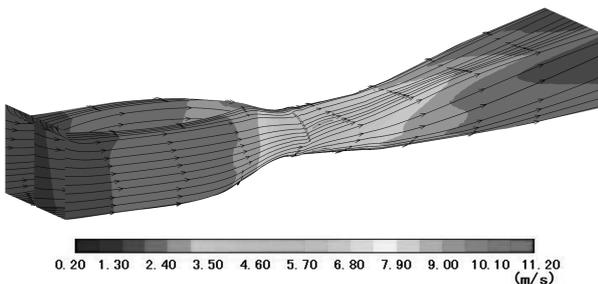


图 6 邳州站前置竖井式贯流泵装置流场图

下游进水流态平稳,上游出水池无明显湍流,无气

泡产生。邳州站于 2013 年 2 月 23 日通过试运行验收,结论为:邳州站试运行机组在起动、停机和持续运行时各部位工作正常,站内各种设备工作协调,停机后检查机组各部位无异常现象,各项检测数据满足设计和规范要求。经评审,邳州站获 2017 ~ 2018 年度中国水利工程优质(大禹)奖。

## 2 前置竖井式贯流泵装置的应用情况

与其它型式的低扬程泵装置相比,前置竖井式

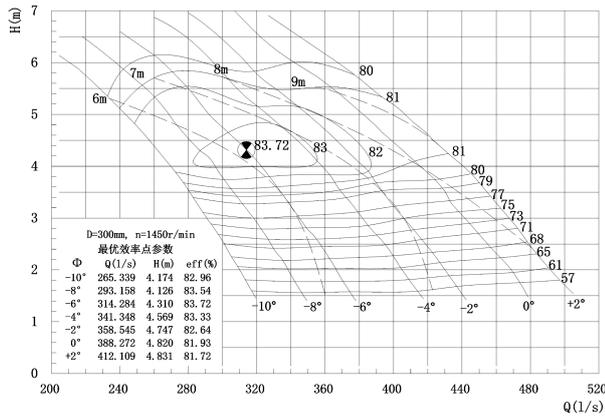


图7 邳州站前置竖井式贯流泵装置模型综合性能曲线  
贯流泵装置具有一系列突出优点:泵装置效率高、空化性能好,水力性能优异;泵装置结构简单,可靠性较高;设计和制造技术趋于成熟;电机通风散热条件较好,安装检修较方便;投资较少<sup>[8-9]</sup>。

上述优点已得到工程界的普遍认可,近10年来对前置竖井式贯流泵装置其应用需求不断增多,表现出非常广阔的应用前景。据不完全统计,已有40余座低扬程泵站采用了前置竖井式贯流泵装置(表2),其中最有代表性的是南水北调东线一期工程的邳州泵站。

表2 部分采用前置竖井式贯流泵装置泵站的主要参数

序号	泵站名称	单泵设计流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	设计扬程 (m)	水泵模型 型 号	叶轮直径 (mm)	水泵转速 (r/min)	nD 值
1	嘉兴毛漾荡泵站	10.0	0.92	2000ZGB10	2000	135.2	270.4
2	无锡梅梁湖泵站	10.0	1.50	350ZMB	2000	140	280.0
3	无锡大溪港泵站	10.0	1.73	2000ZGB-10	2000	165	330.0
4	宁波铜盆浦泵站	12.5	1.72	TJ04-ZL-07	2350	134.6	316.3
5	厦门筭筭湖泵站	16.7	3.44	TJ04-ZL-19	2350	153	359.6
6	常熟常浒河泵站	15.0	0.94	2500ZGB15	2500	113.5	283.8
7	宿迁井头泵站	16.0	1.70	TJ04-ZL-07	2500	125.6	314.0
8	苏州澹台湖泵站	20.0	1.50	2500ZGB20	2500	126.9	317.3
9	余姚候青江泵站	20.0	2.30	2630ZGB20	2630	128.1	336.9
10	余姚泗门泵站	25.0	2.49	TJ04-ZL-07	2630	151.6	398.7
11	宁波甬新泵站	20.0	1.55	TJ04-ZL-07	2650	127.6	338.1
12	湛江大岸泵站	24.0	2.50	2800ZGB24	2800	128.6	360.1

### 3 前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的意义

目前对前置竖井式贯流泵装置的研究主要是采用数值模拟和模型试验方法分析其内部流动特性和测试其外特性。文献[10-17]采用了三维湍流流动数值模拟方法对前置竖井贯流泵装置、进水流道和出水流道流场内部流动进行了许多研究,分析了不同工况下叶轮叶片静压的分布情况和进、出水流道内的水流流动特征;文献[18-20]结合泵站工程的建设需要,研究了流道长度、宽度和高度等控制尺寸以及流道型线对泵装置水力性能的影响,并对前置竖井贯流泵装置进、出水流道进行了优化水力设计研究。根据泵装置模型试验资料,已建前置竖井式贯流泵装置最优工况点效率的范围为72%~83.72%<sup>[21-27]</sup>。

对前置竖井式贯流泵装置的研究与应用已有很多,但各地设计水平不平衡,仍有一些不够成熟的水力设计成果也被应用于工程设计,与应该达到的高水平相比还存在着较大差距。关于前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的研究目前国内外尚未见任何相关的文献资料和报道。

(续表 2)

序号	泵站名称	单泵设计流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	设计扬程 (m)	水泵模型 型 号	叶轮直径 (mm)	水泵转速 (r/min)	nD 值
13	无锡西直湖港泵站	22.5	1.80	2900ZGB22	2900	115	333.5
14	余姚乐安湖泵站	30.0	4.38	TJ04-ZL-02	3000	120	360.0
15	浙江姚江西排引水泵站	20.0	0.30	TJ04-ZL-07	3100	75	232.5
16	嘉兴南台头泵站	37.5	2.26	TJ04-ZL-06	3100	130	403.0
17	宁波慈江泵站	250	0.62	TJ04-ZL-07	3200	75.2	240.6
18	天津海河口泵站	33.0	2.17	TJ04-ZL-07	3200	115	368.0
19	南通九圩港泵站	30.0	1.71	3250ZGB30	3250	105	341.3
20	南水北调邳州泵站	33.4	3.10	TJ04-ZL-06	3300	108	356.4
21	鹤山沙坪河泵站	36.0	2.30	3300ZGB36	3300	115.9	382.5
22	宁波化子闸泵站	37.5	0.32	TJ04-ZL-07	3900	67	261.3
23	宁波澥浦泵站	50.0	1.72	TJ04-ZL-06	3900	81.17	316.6
24	绍兴马山泵站	50.0	1.70	TJ04-ZL-06	4000	82.56	330.2

如能实行前置竖井式贯流泵装置水力设计的标准化,必将对提高我国低扬程泵站的设计和建设水平具有非常重要的意义,具体有以下 3 个方面:

(1)可以保证每座前置竖井式贯流泵站的水力设计高质量,确保水泵装置运行的安全可靠,并最大限度地提高其经济性;

(2)避免低扬程泵站前置竖井式贯流泵装置进行优化水力设计计算和模型试验等大量的重复性研究工作,节省研究经费、缩短工作周期;

(3)便于广大工程技术人员将水力性能优异的前置竖井式贯流泵装置优化水力设计研究成果推广应用,将我国低扬程泵站的建设水平提高到新高度。

水电站对水轮机装置水力设计的标准化工作开展得比较早<sup>[28]</sup>,对最大限度地提高水电站的设计和建设水平发挥了极其重要的作用。

基于以上考虑,本文提出对前置竖井式贯流泵装置进行水力设计标准化研究。

## 4 前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的条件

### 4.1 流道控制尺寸离散性较小

以水泵叶轮直径  $D_0$  为基准值,对表 1 中已建

24 座泵站前置竖井式贯流泵装置进、出水流道的主要控制尺寸(图 8)的相对值分别进行了统计,进、出水流道主要控制尺寸的统计结果分别列于表 3 和表 4。

由统计分析结果可以看到:24 座泵站的流量、扬程和水位等设计参数不同,但前置竖井式贯流泵装置的进水流道、竖井和出水流道控制尺寸相对值的离散性较小,说明前置竖井式贯流泵装置流道实现水力设计标准化具备最关键的基本条件。

### 4.2 南水北调工程水泵模型同台测试成果得到普遍应用

由水利部组织进行的南水北调工程水泵模型同台测试成果<sup>[8]</sup>为南水北调工程和其它工程大型低扬程泵站提供了可靠、准确的水泵模型主要性能参数,为保证大型泵站工程的设计质量提供了重要和必要的技术基础条件。南水北调东线一期工程新建的 21 座泵站中,除 1 座泵站的立式混流泵和 6 座泵站的灯泡式贯流泵装置采用进口的水泵设备外,其余 14 座泵站全部采用了同台测试水泵模型<sup>[29]</sup>。南水北调中线工程的引江济汉进口段泵站、徐鸳口泵站和南水北调来水调入密云水库调蓄工程 7 座低扬程泵站全部采用了同台测试水泵模型。

近十多年来全国建设的其它工程的大中型低

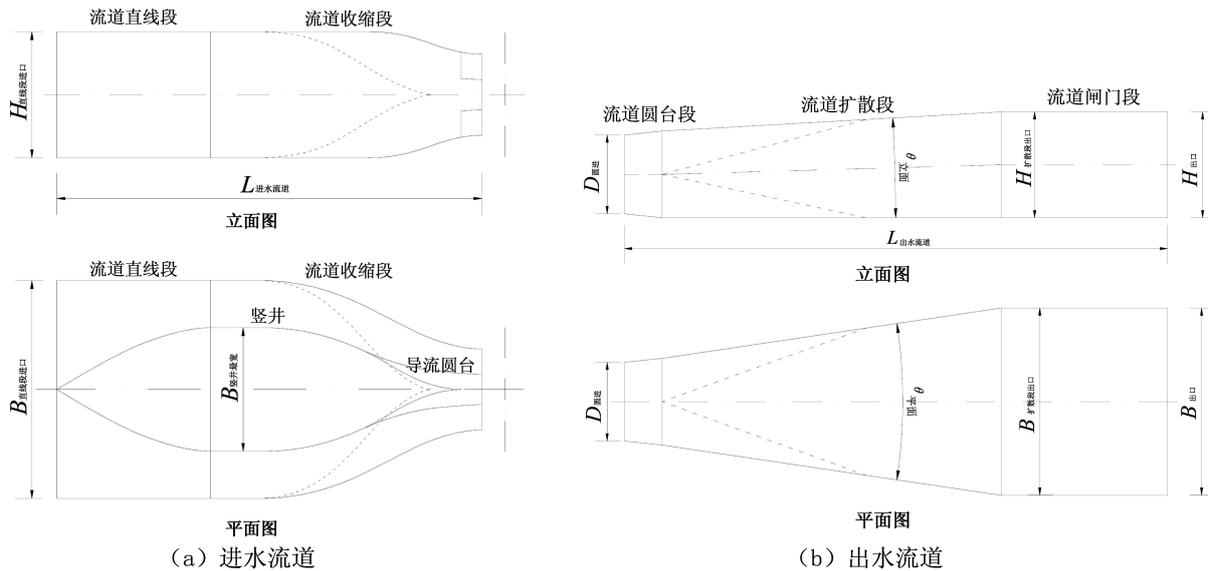


图8 前置竖井式贯流泵装置进、出水流道主要控制尺寸

表3 24座泵站前置竖井式泵装置进水流道控制尺寸的相对值统计分析结果

	应用范围	平均值	离散系数
竖井最宽处的竖井宽度 $B_{\text{竖井最宽}}$	$(1.35 - 1.96) D_0$	$1.54D_0$	0.10
进水流道长度 $L_{\text{进水流道}}$	$(4.09 - 6.11) D_0$	$5.12D_0$	0.12
直线段进口断面宽度 $B_{\text{直线段进口}}$	$(2.31 - 3.02) D_0$	$2.63D_0$	0.07
直线段进口断面高度 $H_{\text{直线段进口}}$	$(1.2 - 1.58) D_0$	$1.39D_0$	0.08
直线段进口断面平均流速 $\bar{V}_{\text{直线段进口}}$	$(0.71 - 0.83) \text{ m/s}$	$0.80 \text{ m/s}$	0.05
水泵名义平均流速 $\bar{V}_{\text{名义}}$	$(3.06 - 4.25) \text{ m/s}$	$3.65 \text{ m/s}$	0.11

表4 24座泵站前置竖井式泵装置出水流道控制尺寸的相对值统计分析结果

	应用范围	平均值	离散系数
出水流道长度 $L_{\text{出水流道}}$	$(2.66 \sim 7.06) D_0$	$4.77D_0$	0.19
扩散段出口断面宽度 $B_{\text{扩散段出口}}$	$(1.77 \sim 3.03) D_0$	$2.42D_0$	0.11
扩散段出口断面高度 $H_{\text{扩散段出口}}$	$(1.06 \sim 1.74) D_0$	$1.34D_0$	0.12
扩散段立面扩散角 $\theta_{\text{立面}} (^{\circ})$	$0.00 \sim 6.68$	2.42	0.89
扩散段平面扩散角 $\theta_{\text{平面}} (^{\circ})$	$12.61 \sim 25.06$	17.10	0.19
扩散段出口断面平均流速 $\bar{V}_{\text{扩散段出口}}$	$(0.73 - 1.16) \text{ m/s}$	$0.89 \text{ m/s}$	0.12

扬程泵站中,南水北调同台测试水泵模型普遍成为首选模型,很多泵站在水泵设备招标文件中明确指定采用南水北调工程同台测试水泵模型。大量工程应用实践表明,同台测试水泵模型的推广应用对提高南水北调泵站工程和我国其它大型泵站工程

的建设水平发挥了非常重要的作用。

前置竖井式贯流泵装置一般应用于低扬程泵站,常用的4种低扬程水泵模型为TJ04-ZL-06、TJ04-ZL-07、TJ04-ZL-19和TJ04-ZL-20,均为南水北调工程同台测试的水泵模型,它们的主要

几何参数和外形尺寸分别见表 5 和图 9。可以看到:除轮毂比各不相同外,这 4 种低扬程水泵模型的叶轮室进口直径、导叶体出口直径、叶轮室进口至水泵叶轮中心距离、导叶体出口至水泵叶轮中心距离等主要尺寸均相同,为水力设计标准化提供了十分有利的条件。

表 5 前置竖井式贯流泵装置采用的 4 种主要低扬程水泵模型主要几何参数

水泵模型 型 号	比转速	叶轮直径 (mm)	轮毂比	叶轮室进口直径 (mm)	导叶体出口直径 (mm)
TJ04-ZL-06	1000	300	0.40	295	315.5
TJ04-ZL-07	1250	300	0.36	295	315.5
TJ04-ZL-19	850	300	0.45	295	315.5
TJ04-ZL-20	800	300	0.47	295	315.5

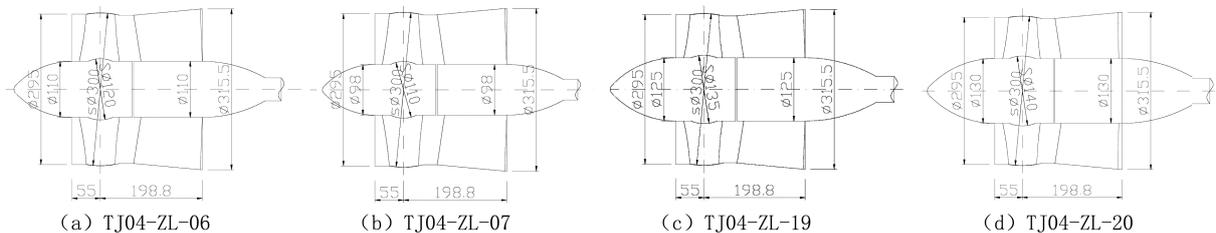


图 9 常用的 4 种低扬程水泵模型的主要安装尺寸

### 4.3 进、出水流道优化水力设计方法日趋成熟

低扬程泵装置进、出水流道水力设计方法的发展大致上经历了三个阶段:(1)1990 年以前,主要采用基于“平均流速法”的一维水力设计方法,这种方法简单易行,但由于将流道内的三维湍流流动简化为一维流动处理,与实际情况相差较大;(2)1990 ~ 2000 年近 10 年,随着计算机的广泛应用和计算流体动力学(CFD)的迅速发展,基于 CFD 的三维优化水力设计方法得到发展和应用,多年来工程界、学术界对大中型低扬程泵站流道的水力设计都很重视,进行了大量的研究工作,取得了显著的成效,特别是南水北调东线工程开工建设以来,为了实现把南水北调工程建设成世界一流工程的目标,对流道水力设计的研究更为重视,取得了更为显著的效果;(3)2000 年近 10 年以来,已逐步形成了较为成熟的基于 CFD 的三维优化水力设计理论及方法<sup>[29]</sup>。

在低扬程泵装置进、出水流道水力设计方法 30 年发展的过程中,我国泵站设计技术规范中关于流道水力设计方法的要求相应地也发生了变化:(1)1986 年发布的《泵站技术规范》(SD 204-86)在其条文说明中推荐了基于“平均流速法”的进、出

水流道一维水力设计方法<sup>[30]</sup>;(2)1997 年发布的国家标准《泵站设计规范》(GB/T 50265-97)将基于“平均流速法”的流道一维水力设计方法从条文说明中删除<sup>[31]</sup>;(3)2008 年发布的行业标准《调水工程设计导则》(SL 430-2008)首次明确提出要求“大中型泵站进、出水流道应进行三维流动数值仿

真计算优化”<sup>[32]</sup>;(4)20 近 10 年发布的国家标准《泵站设计规范》(GB/T 50265-2010)提出了要求“重要的大中型泵站进、出水流道宜采用三维流动数值计算分析”<sup>[33]</sup>。

经过多年来理论研究与工程实践,已逐步形成了较为成熟的基于 CFD 的低扬程泵装置进、出水流道优化水力设计理论及方法,为前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化提供了必要的方法与工具。

## 5 前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的要求

### (1) 水力性能优异

前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化的进、出水流道需经过优化水力设计研究、模型试验检验和工程应用,证明其水力性能优异。

### (2) 系列划分合理

根据已建泵站前置竖井式贯流泵装置进、出水流道控制尺寸的统计结果,合理拟定流道控制尺寸的范围;根据流道水力设计工作的实际需要,对控制尺寸进行合理分档和组合。

### (3) 适用面宽

①标准化前置竖井式贯流泵装置进、出水流道的几何尺寸均以相对值表示(以水泵叶轮直径  $D_0$  为基准值),应用时只需乘以实际采用的水泵叶轮直径即可得到所需要的进、出水流道实际几何尺寸;

②标准化的前置竖井式贯流泵装置进水流道的导流圆台可适用于不同水泵模型的轮毂体直径,需提供与不同水泵模型轮毂体尺寸相配套的导流圆台型线及断面数据。

#### (4)应用方便

①前置竖井式贯流泵装置进水流道分为流道直线段、收缩段、竖井和导流圆台(图 8(a)),在应用于不同泵站时,断面形状简单的流道直线段可作适应性调整,形状复杂的流道收缩段、竖井和导流圆台只作相似变换,其中导流圆台可根据所选水泵模型进行相应选择;

②前置竖井式贯流泵装置出水流道分为流道圆台段、扩散段和闸门段(图 8(b)),在应用于不同泵站时,流道圆台段和断面形状复杂的流道扩散段只作相似换算,断面形状简单的闸门段可根据泵站具体需要进行适当调整;

③编制前置竖井式贯流泵装置进、出水流道水力设计标准化软件,提供进、出水流道的流道单线图、断面位置图及相应的断面数据表。

## 6 结 论

(1)前置竖井式贯流泵装置具有泵装置效率高,水力性能优异,泵装置结构简单,安装检修方便,可靠性高,且相对灯泡贯流机组投资较省,有取代灯泡贯流装置的趋势,在低扬程泵站中的应用越来越多,但应用和设计水平参差不齐,为保证前置竖井式贯流泵装置水力设计水平和提高泵站建设质量,需对前置竖井式贯流泵装置水力设计进行标准化。

(2)基于 CFD 的低扬程泵装置进、出水流道优化水力设计理论及方法已较为成熟,显著提高了泵装置的水力性能,并在工程中得到了很多应用,为前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化提供了必要的方法与工具。

(3)南水北调工程水泵模型同台测试成果在低扬程泵站中得到普遍应用,与前置竖井式贯流泵装置配套由应用的 4 种水泵模型的主要安装尺寸均相同,为前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化提供了十分有利的条件。

(4)基于 CFD 的低扬程泵装置进、出水流道优

化水力设计理论及方法已较为成熟,显著提高了泵装置的水力性能,并在工程中得到了很多应用,为前置竖井式贯流泵装置水力设计标准化提供了必要的方法与工具。

(5)前置竖井式贯流泵装置进水流道、竖井和出水流道主要控制尺寸相对值的离散性较小,水力设计标准化可满足水力性能优异、系列划分合理、适用面宽和应用方便等要求,为前置竖井式贯流泵装置流道实现水力设计标准化提供了最关键的基本条件。

#### 参考文献:

- [1] 梁金栋. 低扬程立式泵装置优化水力设计研究[D]. 扬州:扬州大学, 2012.
- [2] 施卫东. 望虞河开敞式轴流泵装置模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 1997(9):34-37.
- [3] 陆林广, 陈坚, 梁金栋, 等. 灯泡贯流泵装置的优化水力设计[J]. 灌溉排水学报, 2008, 39(3):355-360.
- [4] 徐磊. 斜式轴伸泵装置水力特性及优化设计研究[D]. 扬州:扬州大学, 2009.
- [5] 李松柏, 余真, 张世争, 等. 邳州站工程[J]. 江苏水利, 2013(6).
- [6] 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.
- [7] 中水北方勘测设计研究有限责任公司工程技术研究院. 南水北调东线一期工程邳州泵站竖井贯流水泵装置模型试验报告[R]. 天津:中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2010.
- [8] 陆伟刚, 张旭. 特低扬程竖井贯流泵装置水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6):103-106.
- [9] 蒋红梅. 前置竖井式贯流泵装置三维湍流流动数值模拟及优化设计研究[D]. 扬州:扬州大学, 2011.
- [10] 肖玉平, 郑源, 黄昱. 基于 CFD 的大型竖井式贯流泵装置的流动研究[J]. 水泵技术, 2009(6):24-27.
- [11] 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.
- [12] 肖玉平, 郑源, 江汉如, 等. 竖井式贯流泵装置的数值模拟与优化[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2):143-146.
- [13] 刘君, 郑源, 周大庆, 等. 前、后置竖井式贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊):32-38.
- [14] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 南水北调工程邳州站竖井式贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报,

(下转第 12 页)

(上接第9页)

- 2012, 28(6):50-56.
- [15] 施高萍,王益土,王莺.大型竖井贯流泵站出水流道的水力性能分析[J].水利科技与经济,2015,21(2):1-3.
- [16] 王秋景,郑源,阚阚.竖井贯流泵装置进出水水道优化分析[J].水电能源科学,2015,33(8):132-135.
- [17] 杨帆,刘超,汤方平,成立,吕大为.竖井贯流泵装置内部流动数值模拟与性能分析[J].水力发电学报,2015,33(1):178-184.
- [18] 徐磊,陆林广,陈伟,等.竖井式贯流泵装置水力设计方案比较研究[J].水力发电学报,2011,30(5):207-215.
- [19] 杨帆,刘超,汤方平,等.竖井型线演变及对泵装置水力性能的影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(1):129-138.
- [20] 徐磊,陆林广,王海,等.竖井式进水流道控制尺寸对其水力性能的影响[J].水利水运工程学报,2014(5):47-52.
- [21] 陈松山,葛强,严登丰,等.泵站竖井进水流道数值模拟与装置特性试验[J].农业机械学报,2006,37(10):58-61.
- [22] 陈松山,葛强,严登丰,等.大型泵站竖井贯流泵装置能量特性试验[J].中国农村水利水电,2006(3):54-56.
- [23] 毛少波.竖井式贯流泵在海河口泵站的应用[J].海河水利,2017(3):56-59.
- [24] 郑源,肖玉平,刘文明,等.大型竖井式贯流泵装置的数值模拟与性能预测[J].排灌机械,2009,27(6):393-397.
- [25] 严继松,郑源,佟晨光,等.贯流泵模型装置能量特性试验研究[J].水泵技术,2008(3):5-7.
- [26] 王丽,邹新胜,徐磊,等.井头泵站竖井式贯流泵装置流态及性能分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):123-127.
- [27] 徐磊,陆林广,陈伟,等.邳州站竖井式贯流泵装置模型试验研究[J].灌溉排水学报,2012,31(2):120-123.
- [28] 石清华,李国元,李仲全,等.原型谱标准型水轮机尾水管CFD分析及优化设计[J].东方电机,2002,30(1):32-35.
- [29] 陆林广.高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [30] SD 204-86,泵站技术规范[S].北京:水利电力出版社,1987.
- [31] GB/T 50265-97,泵站设计规范[S].北京:中国计划出版社,1997.
- [32] SL 430-2008,调水工程设计导则[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [33] GB/T 50265-2010,泵站设计规范[S].北京:中国计划出版社,2011.