

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0099

施伟,刘军,陆林广,等.前置竖井式贯流泵装置进出水流道水力设计标准化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):115-122. SHI W, LIU J, LU L G, et al. Hydraulic design standardization for inlet and outlet conduit of tubular pump system with front-positioned shaft[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 115-122. (in Chinese)

前置竖井式贯流泵装置进出水流道 水力设计标准化

施伟¹, 刘军¹, 陆林广², 徐磊², 周歆宇², 孙世宏²

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210019; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:借鉴水轮机尾水管水力设计标准化的成功经验,为使优秀的前置竖井式贯流泵装置在我国低扬程及特低扬程泵站得到更多更好地应用,对前置竖井式贯流泵装置流道水力设计标准化进行了较为深入地研究。按满足工程应用实际需要和分档方案不过于繁多的原则,在常用取值范围内对进、出水流道水力设计系列方案进行合理分档;以竖井宽度和水泵名义平均流速为关键参数,将进水流道划分为24种水力设计标准化方案;以出水流道出口断面宽度和水泵名义平均流速为关键参数,将出水流道划分为17种水力设计标准化方案;经优化水力设计计算,所述进水流道24种方案和出水流道17种方案的水力性能优异。前置竖井式贯流泵装置流道水力设计标准化研究工作在国内外尚属首次,对提高低扬程泵站的设计水平具有重要意义。

关键词:前置竖井式贯流泵装置;进水流道;出水流道;水力设计;标准化

中图分类号:TV675 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Hydraulic design standardization for inlet and outlet conduit of tubular pump system with front-positioned shaft

SHI Wei¹, LIU Jun¹, LU Linguang², XU Lei², ZHOU Xinyu², SUN Shihong²

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd, Nanjing 210019, China;
2. School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Learning from the successful experience of hydraulic design standardization of water turbine draft tube, the excellent tubular pump system with front-positioned shaft are used for more and better in the pumping station with low head and extra-low head. Therefore, the standardization of hydraulic design for conduits of tubular pump system with front-positioned shaft has been premeditated in depth. The statistical rules of conduit sizes of the tubular pump with front-positioned shaft are analyzed, and the series of hydraulic design schemes for the inlet and outlet conduits are reasonably graded. Taking the shaft width and the nominal average velocity of the pump as key parameters, 24 schemes of hydraulic design standardization of the inlet conduit are obtained. Furthermore, 17 schemes of hydraulic design standardization of the outlet conduit are obtained by taking the outlet section width of the outlet conduit and the nominal average velocity of the pump as key parameters. According to the results of the optimal hydraulic design calculation, the hydraulic performances of the 24 inlet conduit schemes and the 17 outlet conduit schemes are excellent. The hydraulic design standardization for the inlet and outlet conduit of tubular pump system with the front-positioned shaft is

收稿日期:2019-11-27 修回日期:2020-03-25 网络出版时间:2020-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200413.1135.002.html>

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

作者简介:施伟(1980—),男,江苏盐城人,正高级工程师,博士,主要从事水利工程建设与管理研究。E-mail:nsbdsw@126.com

通信作者:徐磊(1984—),男,江苏连云港人,副教授,博士,主要从事泵站工程研究。E-mail:xulei1017@163.com

studied for the first time at home and abroad, and it is of great significance to improve the design level of pumping stations with low head.

Key words: tubular pump system with front-positioned shaft; inlet conduit; outlet conduit; hydraulic design; standardization

前置竖井式贯流泵装置具有水力性能优异、结构简单、投资较少等突出优点^[1-3],近 10 年来得到十分广泛地应用^[4-9]。由于前置竖井式贯流泵装置进出水流道的型线较为复杂^[10],一些不够成熟的贯流泵装置水力设计成果也被应用于工程实际,与应该达到的高水平相比还存在着较大差距。

根据统计分析结果,前置竖井式贯流泵装置的进水流道、竖井和出水流道的主要尺寸相对值的离散性较小,具备水力设计标准化的基本条件^[11]。目前对前置竖井式贯流泵装置水力性能已有不少研究^[12-16],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^[17-19]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。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^[20-22],对保证水电站的设计和建设水平发挥了极其重要的作用。目前关于低扬程泵装置水力设计标准化的研究未有报道。前置竖井式贯流泵装置进水流道内布置竖井,其构成及型线复杂,借鉴水轮机尾水管水力设计标准化的成功经验,为使优秀的前置竖井式贯流泵装置在我国低扬程及特低扬程泵站得到更多更好的应用,本文对前置竖井式贯流泵装置进出水流道的水力设计标准化进行了较为深入地研究。

1 进水流道水力设计标准化

1.1 进水流道的组成

前置竖井式贯流泵装置的进水流道可分为流道和竖井两大部分,流道进一步分为流道直线段和流道收缩段,竖井进一步分为竖井段和导流圆台段(图 1)。

1.1.1 流道直线段

流道直线段的作用是引导泵站前池水流平顺地流入进水流道。该段的主要几何参数要有长度、进口断面的宽度及高度。流道直线段的形体特征:流道平面和立面型线均为直线;流道断面形状为矩形;流道进口断面上缘为圆弧形。在进水流道设计中可利用其几何形体简单的特点对流道长度、宽度、高度进行适当调整。



图 1 前置竖井式贯流泵装置进水流道的组成
Fig. 1 Composition of inlet conduit of the tubular pump device with front-positioned shaft

1.1.2 流道收缩段

流道收缩段的作用是使水流平顺有序地加速和收缩,引导水流均匀垂直地进入叶轮室。该段的主要几何参数包括:流道宽度、高度和过渡圆半径。流道收缩段的形体特征:流道断面面积逐步缩小;断面形状由矩形渐变为圆形。

1.1.3 竖井段

竖井段的作用:(1)井内放置轴承、密封、齿轮箱和电机等设备。(2)井外壁与流道内壁之间通过水流,引导水流平顺均匀地流向叶轮室。竖井段的主要几何参数包括:竖井段的长度、高度和竖井外壁最宽处的宽度,竖井段的平面型线。竖井段的形体特征为薄壁井式结构,平面形状为流线型。

1.1.4 导流圆台段

导流圆台段是与竖井相贯连接的细长圆台,其作用为:水泵主轴穿过圆台段与竖井内设备连接;圆台段外壁与流道内壁之间通过水流;对流场进行整流,使水流均匀垂直地进入叶轮室。导流圆台段的主要几何参数:圆台长度,外壁圆半径。

1.2 竖井布置的要求及其对竖井宽度的影响

前置竖井式贯流泵装置在进水流道内设置竖井,用于布置轴承、减速箱、电机等机电设备(有些泵站还用于布置叶片角度调节机构),并留出足够的工作人员操作空间,图 2 为前置竖井式贯流泵装置竖井内部布置示例。

据统计,不同泵站前置竖井式贯流泵装置主要机电设备的尺寸及竖井布置的要求差别较大,各个

泵站对竖井宽度及长度的考虑不同,导致不同泵站的竖井平面形状具有不同特点,有的较为细长,有的相对宽大一些。竖井宽度的大小不仅影响竖井本身的型线及内部布置,而且直接影响到进水水道的宽度、机组中心距、泵房长度、出水水道出口宽度及隔墩厚度尺寸等。因此,满足竖井宽度的要求成为前置竖井式贯流泵装置水力设计的前提条件。

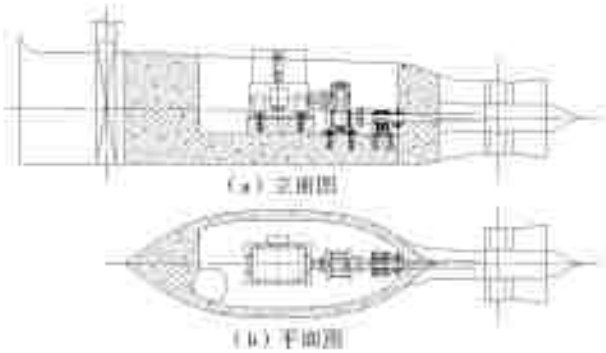


图2 前置竖井式贯流泵装置竖井内部布置示例

Fig. 2 Example of shaft interior layout of the tubular pump device with front-positioned shaft

由于竖井宽度对前置竖井式贯流泵装置进水水道水力设计的影响特别大,故将竖井外壁最大宽度作为前置竖井式贯流泵装置进水水道水力设计的关键参数。

根据统计结果,竖井外壁最大宽度的取值范围为 $(1.35 \sim 1.96)D_0$ ^[11],平均值为 $1.54D_0$,可见不同泵站前置竖井式贯流泵装置进水水道的竖井宽度相差较大。

1.3 水泵名义平均流速及应用

1.3.1 水泵名义平均流速

引入“水泵名义平均流速”的概念,计算公式为

$$\bar{V}_{\text{名义}} = \frac{4Q_0}{\pi D_0^2} \quad (1)$$

式中: $\bar{V}_{\text{名义}}$ 为水泵名义平均流速,m/s; Q_0 为单泵设计流量, m^3/s ; D_0 为水泵叶轮直径,m。

水泵名义平均流速可看成是设计流量通过以叶轮直径为直径的圆断面的平均流速,是低扬程水泵的特征流速^[23]。应用于低扬程泵站的前置竖井式贯流泵装置常需采用较小的 nD 值,所选水泵的叶轮直径相对较大,所以其名义平均流速相对较小。根据统计结果,前置竖井式贯流泵装置水泵名义平均流速的取值范围为 $3.06 \sim 4.25 \text{ m/s}$ ^[11]。

1.3.2 水泵名义平均流速的应用

泵装置水力设计的控制断面及控制流速。根据前置竖井式贯流泵装置进出水水道水力设计的要求,需要控制进出水水道主要断面的流速,以使水道主要尺寸的取值更为合理。为此,本文根据设计经

验,提出如下控制断面及控制流速:进水水道竖井外壁最宽处的过流断面平均流速控制在 1.8 m/s 左右;进水水道进口断面的平均流速控制在 0.8 m/s 左右;出水水道出口断面的平均流速控制在 0.9 m/s 左右。

控制断面平均流速与名义平均流速的关系。根据前置竖井式贯流泵装置单泵设计流量和水道几何尺寸,可以计算水道各控制断面的平均流速

$$\bar{V}_{\text{断面}} = \frac{Q_0}{B_{\text{断面}} \times H_{\text{断面}}} \quad (2)$$

式中: $\bar{V}_{\text{断面}}$ 为水道断面平均流速,m/s; $B_{\text{断面}}$ 为水道断面宽度,m; $H_{\text{断面}}$ 为水道断面高度,m。

将 Q_0 、 $B_{\text{断面}}$ 和 $H_{\text{断面}}$ 均用叶轮直径 D_0 的相对值表示,则式(2)可以变换为

$$\bar{V}_{\text{断面}} = \frac{\bar{V}_{\text{名义}} \times \frac{\pi}{4} D_0^2}{B'_{\text{断面}} D_0 \times H'_{\text{断面}} D_0} = \frac{\pi}{4 B'_{\text{断面}} H'_{\text{断面}}} \bar{V}_{\text{名义}} \quad (3)$$

式中: $B'_{\text{断面}}$ 为水道断面宽度的相对值; $H'_{\text{断面}}$ 为水道断面高度的相对值。

由式(3)可以看出,水道控制断面的平均流速与水泵名义平均流速成正比。

前置竖井式贯流泵装置水力设计关键参数。基于下列理由,将水泵名义平均流速作为前置竖井式贯流泵装置水力设计中的关键参数:水泵名义平均流速定量表达了单泵设计流量与水泵叶轮直径之间的比例关系,是由水泵选型中多个因素(泵装置设计扬程、设计流量、 nD 值、叶轮直径)共同作用所得到的综合性参数;水泵名义平均流速与水道控制断面平均流速成正比。

1.4 进水水道水力设计标准化方案的分档

以竖井宽度为前置竖井式进水水道水力设计标准化的第1关键参数,以适应不同泵站对竖井宽度的不同需求。

以水泵名义平均流速为前置竖井式进水水道水力设计标准化的第2关键参数,以实现针对不同流量时水道断面平均流速的控制。

根据统计结果,竖井宽度和水泵名义平均流速的常用值范围分别取为 $(1.3 \sim 1.8)D_0$ 和 $3.0 \sim 4.5 \text{ m/s}$ ^[11]。

按满足工程应用的实际需要和分档方案不过于繁多的原则,在常用值取值范围内对进水水道水力设计系列方案进行了合理分档,将竖井外壁最大宽度 $B_{\text{竖井最大}}$ 分为 $1.3D_0$ 、 $1.4D_0$ 、 $1.5D_0$ 、 $1.6D_0$ 、 $1.7D_0$ 和 $1.8D_0$ 等6档(图3),将水泵名义平均流速 $\bar{V}_{\text{名义}}$

分为 3.0、3.5、4.0 和 4.5 m/s 等 4 档。

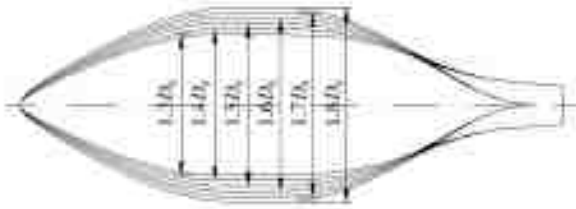


图 3 前置竖井式贯流泵装置竖井宽度的分档
Fig. 3 Grades of shaft width of the tubular pump device with front-positioned shaft

根据设计经验及统计结果,确定进水流道长度为 $5.12D_0$ ^[11],流道高度相对值则根据名义平均流速、竖井最宽处断面流速控制要求和断面宽度相对值进行计算得到。

将竖井宽度和水泵名义平均流速的各档两两组合,形成进水流道水力设计标准化的 24 种分档方案,见表 1。

1.5 进水流道水力设计标准化方案的水力性能

对表 1 所列 24 种进水流道方案进行了三维数值模拟和优化水力设计研究。受篇幅限制,本文仅给出进水流道方案 SJ32 的流场图,见图 4。由图 4

可以看出:在流道竖井段,水流在立面方向和平面方向收缩平缓、均匀;在流道出口段,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。进水流道各方案水力性能主要计算结果见表 2。由于竖井外壁最大宽度和水泵名义平均流速不同,各方案的水力性能有一定差别,但各方案的流速分布均匀度不小于 98.2%、水流入泵平均角度不小于 88.7° 、设计流量时的流道水头损失不大于 0.095 m,均达到水力性能优异的要求。

表 1 前置竖井式贯流泵装置进水流道标准化系列的 24 种方案编号

Tab. 1 24 schemes of standardization series for inlet conduit of the tubular pump device with front-positioned shaft

竖井宽度	名义平均流速/($m \cdot s^{-1}$)			
	4.5	4.0	3.5	3.0
1.3 D_0	SJ11	SJ12	SJ13	SJ14
1.4 D_0	SJ21	SJ22	SJ23	SJ24
1.5 D_0	SJ31	SJ32	SJ33	SJ34
1.6 D_0	SJ41	SJ42	SJ43	SJ44
1.7 D_0	SJ51	SJ52	SJ53	SJ54
1.8 D_0	SJ61	SJ62	SJ63	SJ64

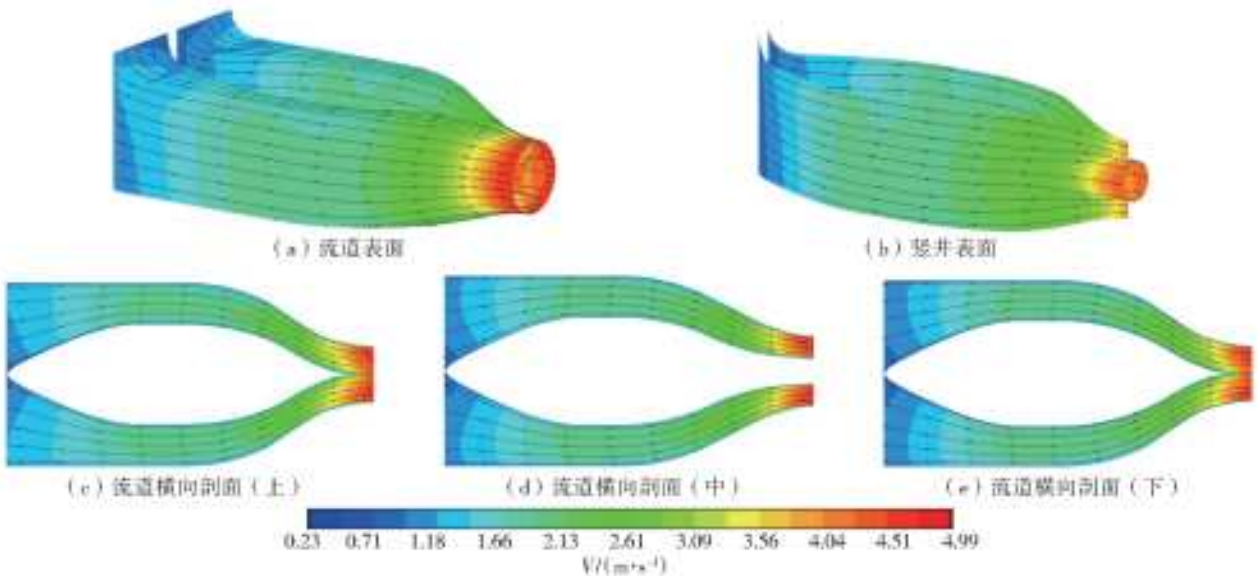


图 4 前置竖井式贯流泵装置进水流道方案 SJ32 流场

Fig. 4 Flow field of inlet conduit scheme SJ32 of the tubular pump device with front-positioned shaft

2 出水流道水力设计标准化

2.1 出水流道的组成

前置竖井式贯流泵装置出水流道分为 3 段:流道圆台段、流道扩散段和流道闸门段,见图 5。

2.1.1 流道圆台段

对导叶体出口水流进行扩散和引导,同时作为

与导叶体连接的预埋段使用。该段的形体特征为:母线为直线的扩散形圆台;内有水滴形导流帽;断面形状为逐渐扩大的圆形。

2.1.2 流道扩散段

流道扩散段的作用是使水流平顺有序地减速,以回收水流动能。该段流道断面面积逐步扩大;流道断面形状由圆形渐变为矩形。

表 2 进水水道水力设计标准化 24 种方案水力性能计算的主要结果

Tab. 2 Main results of hydraulic performance calculation for 24 schemes of inlet conduit of hydraulic design standardization

方案编号	竖井最宽处断面宽度 D_0	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水泵名义平均 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速分布 均匀度/%	水流入泵平均 角度/($^\circ$)	进水水道水头 损失/m	水道水头损失 系数 $\xi_{\text{进水水道}}$
SJ11	1.3	14.13	4.50	98.42	89.02	0.093	0.090
SJ12	1.3	12.56	4.00	98.43	89.09	0.085	0.104
SJ13	1.3	10.99	3.50	98.44	89.15	0.077	0.123
SJ14	1.3	9.42	3.00	98.45	89.23	0.069	0.150
SJ21	1.4	14.13	4.50	98.40	88.95	0.089	0.086
SJ22	1.4	12.56	4.00	98.42	88.99	0.080	0.098
SJ23	1.4	10.99	3.50	98.43	89.07	0.072	0.115
SJ24	1.4	9.42	3.00	98.44	89.11	0.065	0.141
SJ31	1.5	14.13	4.50	98.38	88.91	0.089	0.086
SJ32	1.5	12.56	4.00	98.40	88.95	0.079	0.097
SJ33	1.5	10.99	3.50	98.42	89.03	0.070	0.112
SJ34	1.5	9.42	3.00	98.44	89.07	0.062	0.134
SJ41	1.6	14.13	4.50	98.35	88.88	0.089	0.086
SJ42	1.6	12.56	4.00	98.39	88.94	0.079	0.097
SJ43	1.6	10.99	3.50	98.41	89.01	0.069	0.110
SJ44	1.6	9.42	3.00	98.43	89.05	0.058	0.127
SJ51	1.7	14.13	4.50	98.31	88.82	0.090	0.088
SJ52	1.7	12.56	4.00	98.35	88.91	0.079	0.097
SJ53	1.7	10.99	3.50	98.38	88.97	0.068	0.108
SJ54	1.7	9.42	3.00	98.41	89.04	0.057	0.123
SJ61	1.8	14.13	4.50	98.28	88.77	0.091	0.088
SJ62	1.8	12.56	4.00	98.31	88.87	0.079	0.097
SJ63	1.8	10.99	3.50	98.34	88.97	0.067	0.107
SJ64	1.8	9.42	3.00	98.38	89.04	0.055	0.119



图 5 前置竖井式贯流泵装置出水水道的组成

Fig. 5 Composition of outlet conduit of the tubular pump device with front-positioned shaft

2.1.3 水道闸门段

水道闸门段的作用是设置工作闸门和事故闸门。该段的形体特征为水道平面和立面型线均为直线,水道断面形状为矩形。

2.2 出水水道扩散角的要求及出口断面宽度的影响

2.2.1 出水水道出口断面的控制流速

为使出水水道水力设计标准化控制尺寸的取

值更为合理,根据前置竖井式贯流泵装置出水水道水力设计的要求控制出水水道出口断面的平均流速。对于低扬程泵站,本文前置竖井式贯流泵装置出水水道出口断面的平均流速控制在 0.9 m/s 左右。

2.2.2 出水水道扩散段扩散角的取值

根据《泵站设计规范》(GB 50265—2010),出水水道当量扩散角“宜取 $8^\circ \sim 12^\circ$ ”^[24]。当量扩散角是基于扩散段进出口断面面积的折算量,只是反映了扩散段断面面积的变化情况,在对出水水道扩散段三维型体进行设计计算和流场分析时,需要从平面方向和立面方向同时考虑其型线变化及水流扩散情况。为此,本文在满足《泵站设计规范》(GB 50265—2010)对当量扩散角要求的基础上,还同时考虑了出水水道扩散段的平面扩散角 $\theta_{\text{立面}}$ 和立面扩散角 $\theta_{\text{平面}}$ 。

对于前置竖井式贯流泵装置的出水水道而

言,受出水池最低水位和出水流道挖深等因素的限制,立面扩散角一般较小,其取值范围通常为 $0 \leq \theta_{\text{立面}} \leq 7^\circ$ [11]。

前置竖井式贯流泵装置的出水流道主要是靠平面方向的扩散。在当量扩散角不大于 12° 的条件下,平面扩散角 $\theta_{\text{立面}}$ 一般可取 $16^\circ \sim 18^\circ$ 。根据多年设计经验及统计结果,本文取前置竖井式贯流泵装置出水流道扩散段的平面扩散角 $\theta_{\text{立面}} = 17^\circ$ [11]。

前置竖井式贯流泵装置出水流道的过流断面从进口至出口逐渐扩大,以达到使流道内的流速平缓降低和回收水流动能的目的。出水流道扩散太快会导致水流脱壁、产生旋涡,扩散太慢则导致流道土建尺寸过大,增加投资。因此,采用适宜的扩散角是出水流道水力设计的关键。

由于受到出水池最低水位和出水流道挖深等因素的限制,前置竖井式贯流泵装置出水流道在立面方向的扩散很有限;另一方面,由于前置竖井式贯流泵装置进水流道的宽度比较大,出水流道出口断面的宽度可取较大值。显然,前置竖井式贯流泵装置出水流道主要在平面方向扩散,故平面扩散角对出水流道水力设计的影响很大。

考虑到出水流道扩散段出口断面的宽度对平面扩散角影响很大,本文将出水流道出口宽度列为前置竖井式贯流泵装置出水流道水力设计标准化的关键参数。

2.3 出水流道水力设计标准化方案的分档

以出水流道出口断面的宽度为第 1 关键参数,以适应流道平面扩散角对出口宽度的不同需求。

以水泵名义平均流速为第 2 关键参数,以实现不同流量时流道出口断面平均流速的控制。

根据统计结果,流道出口断面宽度和水泵名义平均流速常用值范围分别取为 $(2.1 \sim 2.8) D_0$ 和 $3.0 \sim 4.5 \text{ m/s}$ [11]。

按满足工程应用的实际需要和分档方案不过于繁多的原则,对出水流道水力设计系列方案进行了合理分档,在常用值取值范围内将流道出口断面宽度分为 $2.1D_0$ 、 $2.2D_0$ 、 $2.3D_0$ 、 $2.4D_0$ 、 $2.5D_0$ 、 $2.6D_0$ 、 $2.7D_0$ 和 $2.8D_0$ 等 8 档,将水泵名义平均流速分为 3.0 、 3.5 、 4.0 和 4.5 m/s 等 4 档。

根据统计结果与设计经验,确定出水流道的平面扩散角为 17° [11],流道出口断面的高度相对值则根据名义平均流速、出口断面宽度相对值和流速控

制要求计算得到。

将各档流道出口断面宽度和各档名义平均流速两两组合,构成出水流道标准化的 32 个方案,见表 3。

表 3 前置竖井式贯流泵装置出水流道标准化系列的 32 种方案编号

Tab. 3 32 schemes of standardization series for outlet conduit of the tubular pump device with front-positioned shaft

出口断面宽度	名义平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	4.5	4.0	3.5	3.0
2.1 D_0	SC11	SC12	SC13	SC14
2.2 D_0	SC21	SC22	SC23	SC24
2.3 D_0	SC31	SC32	SC33	SC34
2.4 D_0	SC41	SC42	SC43	SC44
2.5 D_0	SC51	SC52	SC53	SC54
2.6 D_0	SC61	SC62	SC63	SC64
2.7 D_0	SC71	SC72	SC73	SC74
2.8 D_0	SC81	SC82	SC83	SC84

剔除扩散角不合格的方案。

为使出水流道扩散段在立面方向不出现收缩的情况,其立面扩散角 $\theta_{\text{立面}}$ 应不小于 0 。表 3 中立面扩散角 $\theta_{\text{立面}} < 0$ 的不合格方案均予以剔除。

根据《泵站设计规范》(GB 50265—2010),出水流道扩散段的当量扩散角的取值范围为 $8^\circ \sim 12^\circ$ 。表 3 中当量扩散角超过 12° 的不合格方案均予以剔除。

剔除不合格方案后,符合要求的出水流道水力设计标准化方案共计 17 种见表 4。

2.4 出水流道水力设计标准化方案的水力性能

对表 4 所列出水流道 17 种合格方案进行了三维数值模拟和优化水力设计研究。受篇幅限制,本文仅给出出水流道方案 SC52 的流场图见图 6。可以看到:受流道进口环量的影响,水流以螺旋状进入出水流道;出水流道内水流的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;水流在整个流道内的扩散均匀平缓,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。出水流道水力设计标准化各优化方案水力性能主要计算结果列于表 4。由于出口宽度和水泵名义平均流速不同,出水流道 17 种方案设计流量时的流道水头损失有一定的差别,但均不大于 0.15 m ,满足水力性能优异的要求。

表 4 出水水道水力设计标准化 17 种方案水力性能计算的主要结果

Tab. 4 Main results of hydraulic performance calculation for 17 schemes of outlet conduit of hydraulic design standardization

序号	方案编号	扩散段出口宽度 D_0	水泵名义平均流速/($m \cdot s^{-1}$)	扩散段出口高度 D_0	平面扩散角/($^\circ$)	立面扩散角/($^\circ$)	当量扩散角/($^\circ$)	出水水道水头损失/m	水道水头损失系数 $\xi_{出水水道}$
1	SC14	2.1	3.0	1.156	17.0	0	10.90	0.083	0.181
2	SC23	2.2	3.5	1.249	17.0	1.5	11.69	0.096	0.154
3	SC24	2.2	3.0	1.156	17.0	0	10.53	0.082	0.179
4	SC33	2.3	3.5	1.195	17.0	0.6	10.68	0.099	0.158
5	SC34	2.3	3.0	1.156	17.0	0	10.22	0.080	0.174
6	SC42	2.4	4.0	1.308	17.0	2.1	11.58	0.110	0.135
7	SC43	2.4	3.5	1.156	17.0	0	9.94	0.098	0.157
8	SC52	2.5	4.0	1.256	17.0	1.3	10.72	0.112	0.137
9	SC53	2.5	3.5	1.156	17.0	0	9.70	0.097	0.155
10	SC61	2.6	4.5	1.359	17.0	2.4	11.41	0.125	0.121
11	SC62	2.6	4.0	1.208	17.0	0.6	9.99	0.114	0.140
12	SC63	2.6	3.5	1.156	17.0	0	9.47	0.096	0.154
13	SC71	2.7	4.5	1.308	17.0	1.7	10.67	0.127	0.123
14	SC72	2.7	4.0	1.163	17.0	0.1	9.34	0.117	0.143
15	SC73	2.7	3.5	1.156	17.0	0	9.27	0.095	0.152
16	SC81	2.8	4.5	1.262	17.0	1.1	10.03	0.128	0.124
17	SC82	2.8	4.0	1.156	17.0	0	9.09	0.114	0.140

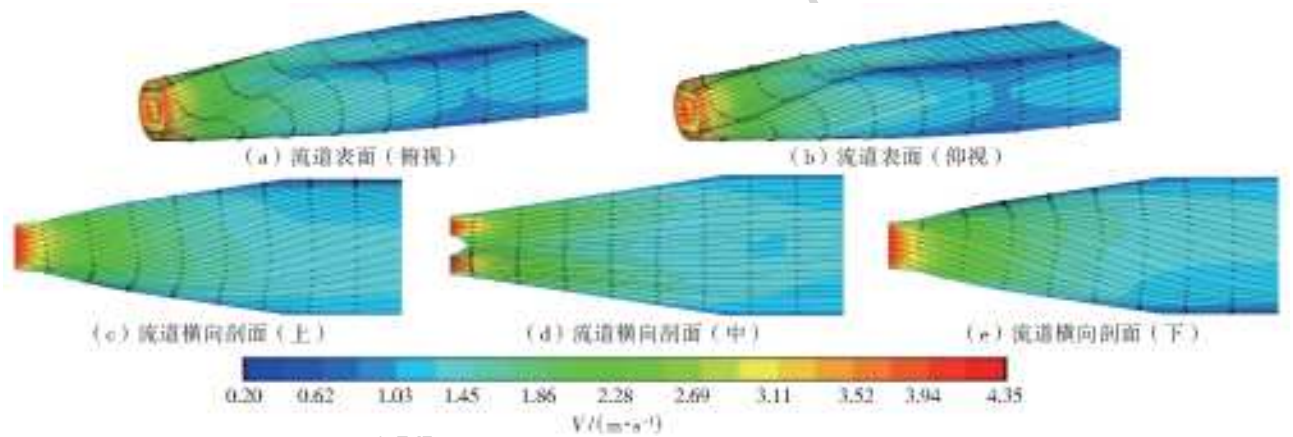


图 6 前置竖井式贯流泵装置出水水道方案 SC52 流场图

Fig. 6 Flow field of outlet conduit scheme SC52 of the tubular pump device with front-positioned shaft

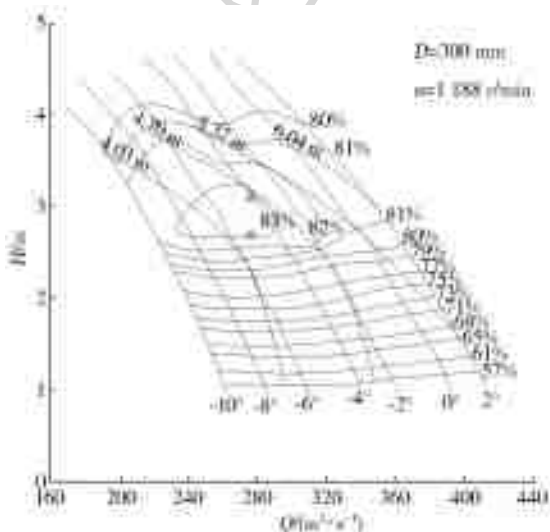


图 7 邳州泵站前置竖井式贯流泵装置模型综合性能曲线

Fig. 7 Model comprehensive performance of tubular pump device with front-positioned shaft of Pizhou pumping station

3 应用实例

南水北调东线一期工程邳州泵站设计输水量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 单泵设计流量 $33.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计扬程和平均扬程分别为 3.1 和 2.7 m, 水泵模型型号为南水北调同台测试的 TJ04-ZL-06, 原型泵叶轮直径和转速分别为 3.3 m 和 108 r/min, 选用 4 台前置竖井式贯流泵装置。根据泵站布置和竖井内的电机、齿轮箱等安装需要, 确定该站进水水道竖井外壁最大宽度相对值为 $1.5D_0$ 、出水水道出口断面宽度为 $2.4D_0$ 。由已知参数可算得邳州泵站装置的水泵名义平均流速为 3.907 m/s 。根据进水水道的竖井外壁最大宽度和水泵名义平均流速两个关键参数, 采用水力设计标准化进水水道 SJ32; 根据出水水道的出口断面宽度和水泵名义平均流速两个关键参数, 采用水力设

计标准化出水流道 SC42。由进水流道 SJ32、出水流道 SC42 与 TJ04-ZL-06 水泵模型组成了邳州站泵装置,该泵装置在中水北方勘测设计研究有限责任公司水力机械试验台^[25]进行了模型试验,结果表明该泵装置水力性能优异,见图 7。

4 结 语

(1)前置竖井式贯流泵装置进水流道和出水流道水力设计标准化方案分档合理、适用面宽、应用方便。

(2)水力设计标准化的进水流道内水流收缩平缓均匀、流线层次分明,水流以垂直于流道出口断面方向均匀流出;各标准化进水流道方案的水力性能优异,流道出口断面流速分布均匀度均不小于 98.2%、水流入泵平均角度均不小于 88.7°、设计流量时的流道水头损失均不大于 0.095 m。

(3)水力设计标准化的出水流道内水流扩散平缓,流道内无旋涡等不良流态;各标准化出水流道方案的水力性能优异,设计流量时的流道水头损失均不大于 0.15 m。

(4)前置竖井式贯流泵装置进出水流道水力设计标准化成果的应用对于提高前置竖井式贯流泵站泵装置水力设计的速度和质量具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2012.06.009.
- [2] 赵洁.沙坪联围泵站改造主机设备选型探讨[J].水电与新能源,2010(4):52-54. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.2010.04.012.
- [3] 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. DOI: 10.7666/d.y2050022.
- [4] 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,2012,28(6):50-56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.009.
- [5] 何继业,陈世杰,许旭东,等.九圩港泵站泵装置模型试验分析[J].治淮,2017(7):14-16.
- [6] 汤泳,游孟陶.化子闸泵站机组选型分析[J].城市道桥与防洪,2019(2):132-134. DOI: 10.16799/j.cnki.cs-dqyfh.2019.02.035.
- [7] 田江,俞军锋,吴强.马山泵站选型与模型试验分析[J].浙江水利水电学院学报,2019,31(4):46-49. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7092.2019.04.009.
- [8] 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. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.027.
- [9] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2017.03.018.
- [10] 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.
- [11] 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):1-8,12.
- [12] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2006.10.016.
- [13] 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.
- [14] 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. DOI:10.3969/j.issn.1006-7175.2015.02.002.
- [15] 王秋景,郑源,阚阚.竖井贯流泵装置进出水流道优化分析[J].水电能源科学,2015,33(8):132-135.
- [16] 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(4):120-123. DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2012.02.003.
- [17] 徐磊,陆林广,陈伟,等.竖井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):207-307.
- [18] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2014.01.013.
- [19] 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. DOI:10.16198/j.cnki.1009-640x.2014.05.004.
- [20] 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. DOI:10.3969/j.issn.1001-9006.2003.03.009.
- [21] 李仲全.尾水管水力设计与 CFD 分析[J].东方电机,2001(1):14-18.
- [22] WANG L, LI B, ZHAO W. Analysis of internal flow of narrow high draft tube based on CFD[J]. Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, 2016, 39(9):117-123.
- [23] 刘军,龚玉栋,王亦斌.叶轮直径对立式泵装置流道水力损失的影响[J].南水北调与水利科技,2008,6(5):67-69. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2008.05.026.
- [24] GB/T 50265—2010.泵站设计规范[S].
- [25] 何成连,蒋玉华,张智彬,等.南水北调工程水泵模型同台测试及试验台简介[J].水利水电工程设计,2006,25(2):29-33. DOI:10.3969/j.issn.1007-6980.2006.02.011.