

核电厂海水循环泵肘形进水流道优化设计

张郭杨^{1,3}, 智一凡^{2,3}, 朱荣生^{1,3}, 林彬^{1,3}, 付强^{1,3*}

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;
3. 核电泵及装置智能诊断运维联合实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为提高核电厂海水循环泵运行的稳定性, 基于 CFD 数值模拟对海水循环泵肘形进水流道进行优化设计。以国内某核电厂的进水流道为研究对象, 建立全新坐标系, 通过理论推导得出肘形流道控制参数之间的函数关系, 根据流道性能评判指标等参数, 通过数值模拟研究肘形进水流道 4 个重要控制参数对流道水力性能的影响, 优选出最佳方案并进行试验验证。结果表明, 在设计流量下优化后的流道出口平均流速提高了 0.026 m/s, 流速分布均匀度降低 0.13%, 水流平均角度提高 0.034°, 水力损失降低 11.2%。本文的研究结果显示提出的肘形流道优化设计方法快速、可靠, 具有出口流态较好、水力损失较小等优点, 可为工程建立提供一定的参考。

关键词: 核电厂海水循环泵; 肘形进水流道; 数值模拟; 模型试验; 水力性能

中图分类号: TH3 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)06-0080-09

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4982

Optimum Design of Inlet Channel of Seawater Circulating Pump in Nuclear Power Plant

ZHANG Guoyang^{1,3}, ZHI Yifan^{2,3}, ZHU Rongsheng^{1,3}, LIN Bin^{1,3}, FU Qiang^{1,3*}

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology Jiangsu University, Zhenjiang 212013 China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840 China;
3. The Joint Lab of Intelligent O & M for NPP Pump, Zhenjiang 212013 China)

Abstract: To improve the operation stability and construction economy of the seawater circulating pump in nuclear power plant, the elbow inlet channel of the seawater circulating pump was optimized based on CFD numerical simulation. Taken the inlet flow path of a domestic nuclear power plant as the research object, a new coordinate system was established. The functional relationship among parameters of the elbow flow path control was obtained by theoretical deduction. According to performance evaluation indexes of the flow channel, the influence of the four main parameters of the elbow inlet channel on its hydraulic performance has been studied by numerical simulation. Meanwhile, the optimized elbow inlet channel was

收稿日期: 2023-06-08

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U20A20292)。

第一作者: 张郭杨(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流体机械及工程研究。

ORCID: 0009-0007-7611-6498 E-mail: 921126798@qq.com

* 通信作者: 付强(1975—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为流体机械(泵)及装置系统的研究与开发。

ORCID: 0000-0002-5697-7940 E-mail: ujsfq@sina.com

引用格式: 张郭杨, 智一凡, 朱荣生, 等. 核电厂海水循环泵肘形进水流道优化设计[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 80-88.

ZHANG Guoyang, ZHI Yifan, ZHU Rongsheng, et al. Optimum Design of Inlet Channel of Seawater Circulating Pump in Nuclear Power Plant[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(6): 80-88.

verified by experiment. The results show that under the design flow rate, the average flow velocity at the outlet of the optimized flow channel is increased by 0.026 m/s, and the uniformity of flow velocity distribution is reduced by 0.13%, and the average flow angle is increased by 0.034°, and the hydraulic loss decreases by 11.2%. It can be seen that the elbow channel optimization design method proposed in this paper is fast and reliable, and has the advantages of good outlet flow pattern and small hydraulic loss. It can provide a favorable reference value for the establishment of the project.

Keywords: seawater circulating pump for nuclear power plant; elbow inlet channel; numerical simulation; model test; hydraulic performance

进水流道属于核电厂循环水系统的重要组成部分,建在循环泵装置的前部,连接泵站前池,其作用是为了给循环泵装置提供良好的进水流态。入水状态不佳不但会增加泵内损失,还会降低泵的空化性能^[1-3]。肘形进水流道是我国大型泵站普遍采用的进水流道形式,其应用广泛,水力特性较好。

长期以来,国内外学者在设计肘形进水流道时都以经验参数为基础,绘制出剖面轮廓图,将流速和流道长度关系曲线的平滑与否作为对设计方案合理性进行评价的基础,并给出了肘形进水流道重要几何结构尺寸的参考范围^[4-7]。目前,肘形进水流道设计缺乏定量研究,其结果虽能满足规范要求,但并非最佳设计方案。储训^[8]采用数学分析的方法,提出一种适用于大型泵站肘形进水流道的计算方法,并给出了流道几何参数与过水断面面积之间的方程。施伟等^[9]运用VB程序设计语言对AutoCAD进行二次开发,设计出流道线型优化设计软件。采用CFD技术对进水流道内流速、压力、水力损失等进行分析,是量化评价进水流道结构合理与否的重要技术途径。董雷等^[10]通过采用三维湍流数值仿真技术对肘形进水流道的水力特性进行分析,得到肘形进水流道的基本特性,给出了某一区域内不同控制参数对肘形进水流道水力特性的影响规律。陆林广等^[11]发现不带模型泵的泵站进水流道试验模型得到的实验数据与使用模型泵的实验数据基本吻合,该方法不仅可大幅度降低实验成本,还可以节省实验时间,便于观察和记录。杨帆等^[12]分析了肘形进水流道在不同运行工况下的水力特性,揭示了不同运行工况下流道内部的三维流动规律,并提出流道弯曲段的设计是肘形进水流道结构设计及优化的重点。张驰等^[13]提出进水流道“可分原理”,对肘形进水流道不同底板上翘角度和后壁弯曲段半径进行比较,结果表明随着

底板倾角的增加,对流道水力性能的影响将逐渐增加,适当地减小流道后壁外圆半径可以使流道和进水池工程量减少,但其作用有限。

本文结合现有核电厂泵站工程实例,建立肘形进水流道剖面轮廓线方程组,推导出流道主要控制参数之间的几何关系式,基于CFD数值模拟技术,研究流道参数对水力性能的影响规律,优选出最佳方案,并进行试验验证。

1 肘形流道优化设计

1.1 进水流道数学模型的建立

肘形进水流道的主要控制参数有水泵叶轮中心高度 H_w 、流道高度 H_L 、直锥段高度 H_Z 、喉管高度 H_k 、流道进口断面高度 H_j 、流道进口宽度 B_j 、弯曲段上轮廓圆半径 R_1 、弯曲段下轮廓圆半径 R_2 、顶板仰角 α 、底板翘角 β 、直锥段收缩角 γ 、流道长度 X_L ,其中水泵叶轮室进口高度 H_p 是指从泵的叶轮中心线到流道出口的高程之差,是通过泵的结构来决定的。

参考《泵站设计标准》^[1]和《火力发电厂循环水泵房进水流道设计规范》^[4]推荐的肘形进水流道设计方法,并根据目前国内一些已建成肘形进水流道的控制参数,以流道出口圆心为原点,建立全新坐标系,如图1所示。

由图可知直线 N_1-N_2 方程:

$$y = \cot \gamma \left(x - \frac{D}{2} \right) \quad (1)$$

直线 M_1-M_2 方程:

$$y = -\cot \gamma \left(x + \frac{D}{2} \right) \quad (2)$$

弯曲段上轮廓圆方程:

$$\left(x - \frac{D}{2} + \frac{R_1}{\cos \gamma} \right)^2 + y^2 = R_1^2 \quad (3)$$

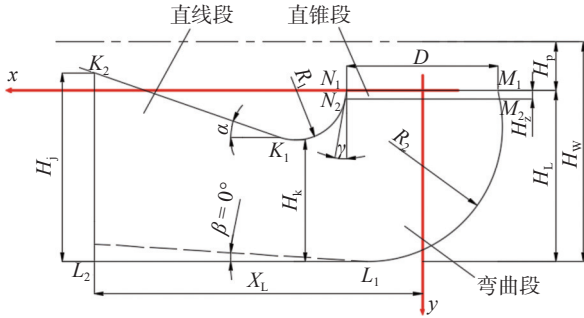


图1 肘形进水流道剖面图

Fig. 1 Elbow inlet channel profile

弯曲段下轮廓圆方程:

$$\left(x - R_2 \cos \gamma + \frac{D}{2} + R_1 \tan \gamma \sin \gamma\right)^2 + (y - R_1 \sin \gamma - R_2 \sin \gamma)^2 = R_2^2 \quad (4)$$

直线 \$K_1\$-\$K_2\$ 方程:

$$y - R_1 \cos \alpha = -\tan \alpha \left(x - R_1 \sin \alpha - \frac{D}{2} - \frac{R_1}{\cos \gamma}\right) \quad (5)$$

直线 \$L_1\$-\$L_2\$ 方程:

$$y = H_L \quad (6)$$

直线 \$K_2\$-\$L_2\$ 方程:

$$x = X_L \quad (7)$$

流道剖面轮廓线各交点的坐标分别为:

$$\begin{aligned} & N_1 \left(\frac{D}{2}, 0 \right), M_1 \left(-\frac{D}{2}, 0 \right), \\ & N_2 \left(R_1 \tan \gamma \sin \gamma + \frac{D}{2}, R_1 \tan \gamma \cos \gamma \right), \\ & M_2 \left[-\left(R_1 \tan \gamma \sin \gamma + \frac{D}{2} \right), R_1 \tan \gamma \cos \gamma \right], \\ & K_1 \left(R_1 \sin \alpha + \frac{D}{2} + \frac{R_1}{\cos \gamma}, R_1 \cos \alpha \right), \\ & K_2 (X_L, H_L - H_j), \\ & L_1 \left(R_2 \cos \gamma - \frac{D}{2} - R_1 \tan \gamma \sin \gamma, H_L \right), \\ & L_2 (X_L, H_L). \end{aligned}$$

由此可得到流道剖面轮廓线的方程组表达式。在一定范围内改变流道参数,便可得到不同的流道剖面轮廓线,使得肘形进水流道的设计更加方便。根据上述表达式可推导出流道弯曲段几何参数之间的影响关系式:

$$H_L = H_W - H_P \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{H_L - H_K - H_Z}{1 - \sin \gamma} \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{H_L - H_Z}{1 + \sin \gamma} \quad (10)$$

$$\arctan \alpha = \frac{|H_j - H_L + R_1 \cos \alpha|}{X_L - \left(\frac{R_1}{\cos \gamma} + \frac{D}{2} + R_1 \sin \alpha \right)} \quad (11)$$

本文重点研究流道弯曲段的参数设计,即叶轮中心高度 \$H_w\$、喉管高度 \$H_k\$、直锥段高度 \$H_z\$、直锥段收缩角 \$\gamma\$、顶板仰角 \$\alpha\$、弯曲段上下轮廓圆半径 \$R_1\$、\$R_2\$ 等。由关系式 (8)—(11) 可知, \$R_1\$、\$R_2\$、\$\alpha\$ 可通过其他参数推导得到,因此设计研究方案时只需要考虑其他参数即可。

1.2 模型选取及建立

由于肘形流道出口 \$D\$ 受到叶轮直径的限制,可将其作为长度标尺。以国内某核电厂循环水泵站进水流道为原型,其主要尺寸如图 2 所示,原模型中流道出口直径 \$D=3000\$ mm。根据标准中提出的主要控制参数区间拟定进水流道方案,参数区间如表 1 所示。\$X_L\$、\$B_j\$、\$H_j\$ 不变, \$\beta\$ 为 \$0^\circ\$, 改变 \$H_w\$、\$H_k\$、\$H_z\$、\$\gamma\$、\$R_1\$、\$R_2\$ 和 \$\alpha\$, 采用单因素变化的方法,把流道的主要控制参数带入关系式 (8)—(11), 求出其他控制参数。在分析各主要控制参数对肘形进水流道水力特性影响时,保持其他控制参数不变,最后选出符合要求的参数方案。

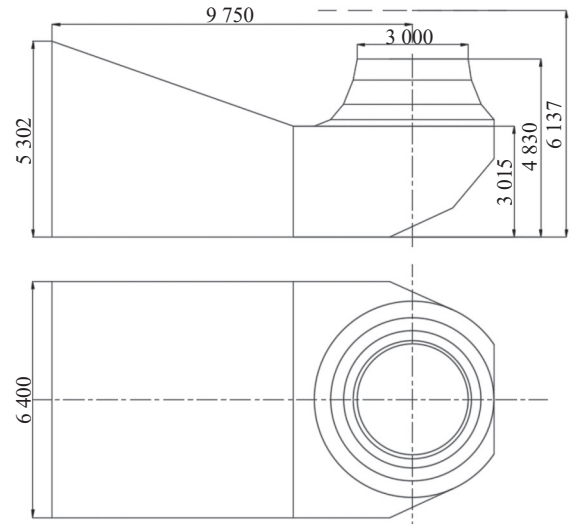


图2 进水流道主要尺寸示意图

Fig. 2 Main dimension schematic of inlet channel

2 数值模拟计算方法

2.1 模型网格生成

三维数值模拟区域包括前池段、流道段和出水直管段 3 部分。借助 CREO 等三维设计软件建

表1 肘形进水流道的几何参数范围
Tab.1 Geometric parameter range of elbow inlet channel

流道主要控制参数	参数范围
叶轮中心高度 H_w/D	1.5~2.2
喉管高度 H_k/D	0.8~1.1
直锥段收缩角 $\gamma/(\circ)$	8~12
直锥段高度 H_z/D	0.1~0.3
顶板仰角 $\alpha/(\circ)$	15~25
底板翘角 $\beta/(\circ)$	0
弯曲段上轮廓圆半径 R_1/D	0.2~0.5
弯曲段下轮廓圆半径 R_2/D	0.8~1.2

立数值模拟的几何模型。为了提高计算收敛性和计算精度,采用多面体与六面体结合的混合网格^[14]。进水流道附近流速梯度变化较大,对这部分区域进行网格加密处理。设计流量下,对原型流道进行网格无关性检验,当网格数量在200万以上时,计算所得的水力损失不随网格数量增加而改变,因此网格数选取230万,满足计算精度要求。模型区域网格如图3所示。图中以流道出口截面原点为坐标原点, x 轴沿流道长度方向, y 轴沿流道宽度方向, z 轴平行于直管段中心轴线,方向向下。

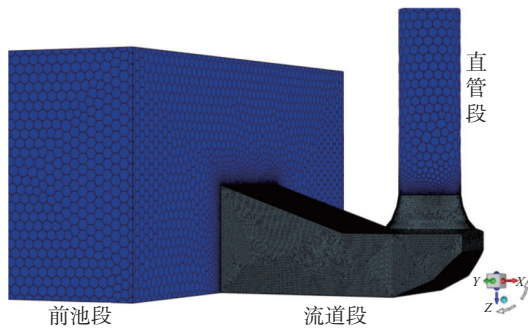


图3 流道计算区域与网格划分
Fig.3 Flow path calculation area and grid division

2.2 控制方程和边界条件

泵站进水流道内水流的流动属于不可压缩湍流流动。物理模型的控制方程包括连续性方程、动量方程以及标准 $k-\varepsilon$ 模型中的 k 方程和 ε 方程^[15-17]。

进口边界条件设置为质量流量进口。由于出口边界处压力和速度均未知,从流道的出口往上等断面延伸3倍圆形管道的直径,将其定义为出口,可以将该流动视为完全发展的^[18],因此出口边界条件可设置为自由出流。泵站前池的水面为开放的水面,不考虑风造成的切应力和介质之间的热量交

换,前池上表面可设置为对称边界条件。对所有固壁处的节点应用无滑移边界条件^[19]。

3 主要控制参数对流道性能的影响

3.1 流道性能评判指标

泵站进水流道的功能是将水流顺畅、均匀地导入到叶轮室中,为水泵提供一个好的进水环境,因此可以引出3个流道性能评判指标,具体表达式如下。

1) 流道出口截面的流速均匀度:

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (u_{ai} - u_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \quad (12)$$

2) 流道出口截面的水流平均角度:

$$\theta_p = \frac{\sum_{i=1}^m \left[90^\circ - \arctan \left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}} \right) \right]}{m} \quad (13)$$

3) 水力损失:

$$\Delta h = E_1 - E_2 \quad (14)$$

式中: u_a 为流道出口断面的平均轴向速度; u_{ai} 为该断面各测点的轴向速度; u_{ti} 为流道出口断面各测点的横向速度; m 为数值计算时该断面所划分的测点个数; E_1 、 E_2 为流道进、出口处总水头。

3.2 叶轮中心高度 H_w 的影响

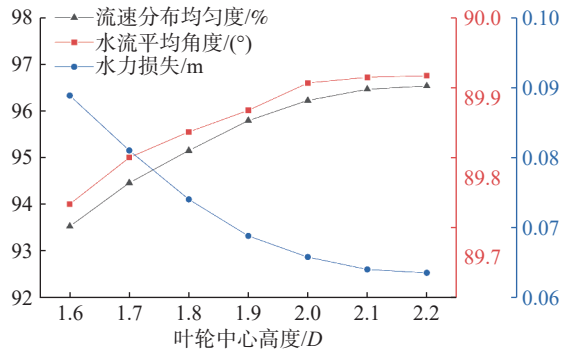
肘形进水流道叶轮中心高度优化计算的范围为 $H_w=(1.5\sim 2.2)D$ 。经模拟计算得到叶轮中心高度的变化对流道评判指标的影响如图4所示。

由图4可以看出: H_w 对流道性能的影响在不同区间的变化规律有较大差异,当 $H_w < 2.0D$ 时,提高 H_w 后流道水力性能得到显著改善;当 $H_w > 2.0D$ 时,随着 H_w 的增加,流道的水力性能提升速度逐渐变慢。

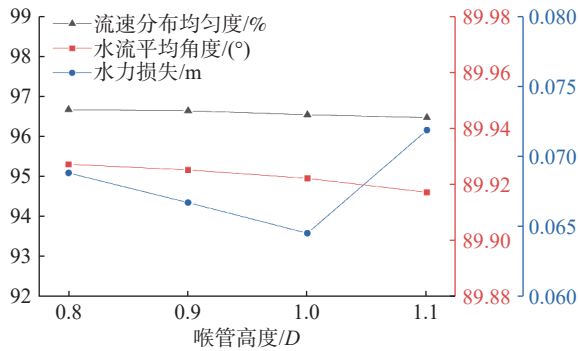
水流入流道中由于水流方向的改变,水流在弯曲段处的流速分布呈现出内侧流速大于外侧流速的特点。提高 H_w 意味着流道对水流进行调节的余地增加,但提高 H_w 会使泵站地基的开挖深度更大,从而使建设成本更高。综合水力性能和工程成本等考虑,叶轮中心高度 H_w 建议为 $2.0D$ 。

3.3 喉管高度 H_k 的影响

肘形进水流道喉管高度优化计算的范围为

图4 H_w 对评判指标的影响曲线Fig. 4 Impact curve of H_w on evaluation index

$H_k=(0.8\sim 1.1)D$ 。经模拟计算得到喉管高度的变化对渠道评价指标的影响如图5所示。

图5 H_k 对评判指标的影响曲线Fig. 5 Impact curve of H_k on evaluation index

由图5可以看出:随着 H_k 的增加,渠道出口断面的流速均匀度和水流角度逐渐降低,水头损失呈现先略有减小随后增加的趋势;当 H_k 的取值为 $1.0D$ 时,水力损失达到最低。

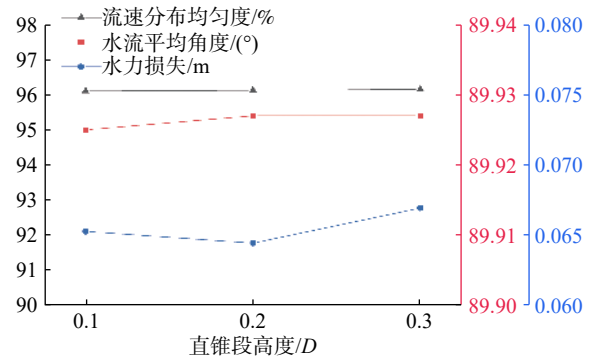
在保持叶轮中心高度 H_w 不变的情况下,降低喉管高度 H_k 会使渠道在弯曲段后立面上的高度增加,增大了水流的二次整流距离,使渠道出口的流态分布更加均匀,流向更加笔直,但当 H_k 降低至一定程度后,会因为过流面积缩小而使渠道喉部水流速度提高,导致水力损失随之加大;因此,喉管高度 H_k 取 $1.0D$ 比较合适。

3.4 直锥段高度 H_z 的影响

在保持渠道基本尺寸不变的条件下,直锥段高度的变化对渠道评判指标的影响如图6所示。

由图6可以看出,增加 H_z 后流速均匀度、水流平均角度基本不变,水力损失先略微下降随后上升。

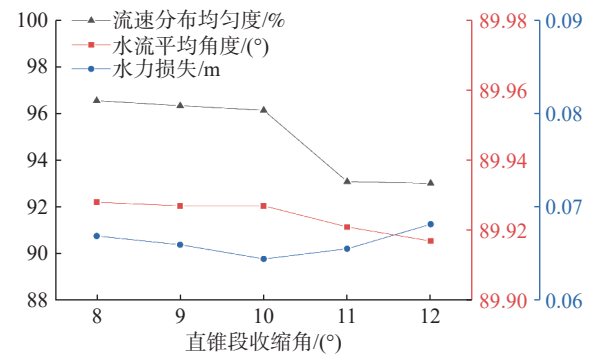
在渠道基本尺寸不变的条件下,过大的 H_z 会给渠道弯曲段的线型调整带来困难(尤其在水泵叶轮中心高度较小的情况下),因此直锥段高度 H_z 应

图6 H_z 对评判指标的影响曲线Fig. 6 Impact curve of H_z on evaluation index

尽量短一些。另外,直锥段常由水泵叶轮室前的套管和固定在混凝土渠道上的座环两部分组成,以便于循环泵的安装。因此,直锥段高度也不宜过短,必须满足水泵安装方面的要求。本文直锥段高度建议取 $0.2D$ 。

3.5 直锥段收缩角 γ 的影响

肘形进水渠道直锥段收缩角优化计算的范围为 $\gamma=0^\circ\sim 12^\circ$ 。直锥段是混凝土浇筑的进水渠道与水泵叶轮室之间的联结段。水泵厂所用锥角 γ 的取值一般较大,国内大型泵站渠道收缩角大多取 $8^\circ\sim 12^\circ$ 。直锥段收缩角度的变化对渠道评判指标的影响如图7所示。

图7 γ 对评判指标的影响曲线Fig. 7 Impact curve of γ on evaluation index

由图7可以看出:随着 γ 的增大,整流效果降低,导致出口流速分布均匀度降低;而出口水流平均角度受收缩角 γ 的影响较小,呈略有下降趋势;水力损失对收缩角 γ 的变化敏感度较高,在收缩角 $\gamma=10^\circ$ 时水力损失最小,为方案中的最优角度。本文直锥段收缩角 γ 建议取 10° 。

4 优化前后方案对比

依据上节得出的结论就某泵站进水渠道提出

相应的优化方案,主要参数如表 2 所示,优化前后方案的流道型线比较如图 8 所示。

表 2 肘形进水流道主要设计参数

Tab. 2 Main design parameters of elbow inlet channel

H_w/D	H_k/D	$\gamma/(\circ)$	H_z/D	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	R_1/D	R_2/D
2.0	1.0	10	0.2	20	0	0.5	1.1

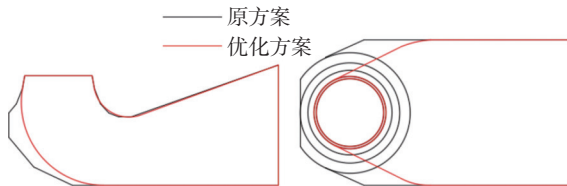


图 8 进水流道方案比较

Fig. 8 Comparison of inlet channel schemes

4.1 肘形流道内流场分析

经过计算得到如图 9 所示设计工况下流道出口处各特征截面的速度分布云图。

图 9 (a)—(d) 为优化前后的速度分布云图。可以看出:在流道直线渐缩段内由于过流断面逐渐变

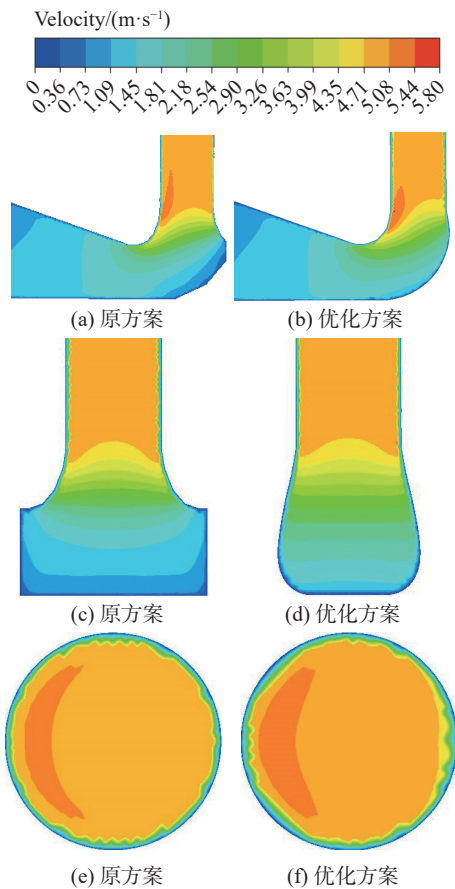


图 9 优化前后方案各特征截面速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of each characteristic section before and after optimization

小,流速逐渐增加;水流从流道直线渐缩段进入流道弯曲段后,由于过流断面方向急剧变化,面积加速变小,导致水流方向急剧变化,流速分布不均,呈梯度逐渐增加;水流在流出流道出口约 0.3D 后,流速趋于均匀。综上表明,在流道内,特别是流道弯曲渐缩段的流态更为重要。原方案弯曲段下轮廓存在低流速区域,且非光滑过度,整流效果较差,水力损失严重。优化后的进水流道在弯曲段流态明显改善,低速区域面积减少,水流均匀过渡,有效地降低了水力损失,截面内没有回流现象,流场平稳。

图 9 (e)—(f) 为优化前后的流道出口截面速度分布云图。可以看出:出口截面处流道内侧的流速大于外侧,有月牙状的高流速区域,边壁流速为零;与原流道相比,优化后的流道在弯曲段流动时能量损耗更少,出口截面流速较大,从而使高流速区域面积略高于原流道,但流速均匀度均能满足水泵对叶轮进口水流的要求。

4.2 模拟计算结果分析

设计工况下优化前后方案流道性能评价指标计算结果如表 3 所示。

表 3 水力性能评价指标计算结果

Tab. 3 Calculation results of hydraulic performance evaluation indexes

流道性能评价指标	原方案	优化方案
$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.251	2.277
$V_u/\%$	95.986	96.116
$\theta_p/(\circ)$	89.924	89.958
$\Delta h/\text{mm}$	72.67	64.55

原方案流道有较长的喇叭管,轴向整流效果略优于肘形流道。优化后的肘形流道弯曲段光滑过渡,有效地减少了水流的能量损失,为水流入出水直管提供了更好的入流条件。原方案流道的弯曲段下轮廓有较大的角度变化,且流速存在较多梯度,能量损失较大。在设计工况下优化方案与原方案相比,流道出口平均流速提高了 0.026 m/s,大大降低了水流通过流道产生的损失,流速分布均匀度 V_u 降低 0.13%,水流平均角度 θ_p 提高 0.034°,水力损失降低 11.2%。综合上述分析,优化方案对流道性能有很大的提升。

5 模型试验验证

5.1 试验台搭建

对模型等比例缩小安装在试验台上进行模型

试验^[20]。模型的几何比尺 $\lambda=20$, 流道出口直径为 150 mm, 动力泵的额定流量 $Q_d=143.26 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

模型实验在江苏大学国家水泵中心的水力机械试验台上进行。试验台包括动力系统、管路系统、测量装置、水箱、优化前后流道模型以及试验拍摄系统。进水流道、出水直管段与进水池靠近流道处用有机玻璃制作, 用于观察水流流态, 记录测量装置读数。有机玻璃糙率满足糙率比尺, 其他全部用金属板焊接而成。实验系统示意图和模型装置如图 10 所示。



图 10 实验系统示意图和模型装置

Fig. 10 Schematic diagram and model device of experimental system

流道出口的出水直管段底部 100 mm 处的水平面设有 4 个测压管 1—4, 用于检测流道出口不同方向的出口压力。对 4 个测压管读数的方差进行对比, 方差越小, 说明这一截面水流流速越均匀。出水直管段顶部设有旋度计, 旋度计装有 4 个平直叶片组成的旋桨。旋度计的旋桨在切向流速的作用下发生旋转, 其旋转速度 n 可通过传感器测出, 从而可以计算出流道出口的切向流速, 切向流速越小, 说明这一截面水流平均角度越接近 90° 。进水池靠近流道处底部设有一个测压管 0, 用于检测水箱压力, 测压管 0 到测压管 1—4 的平均距离减去高度差, 即为流道水力损失, 监测点的高度差为 260 mm。

5.2 试验结果分析

两种进水流道均属于有压输水管道, 且流道内 Re 达到阻力平方区, 采用欧拉相似准则:

$$\frac{\lambda_{\Delta p}}{\lambda_p \lambda_v^2} = 1 \quad (15)$$

由于原型与模型的介质相同, 即 $\lambda_p=1$, 动力泵在设计工况下 $\lambda_v=2.152$, 因此原型与模型之间的流道水头损失比为

$$\lambda_{\Delta h} = \lambda_{\Delta p} = 4.63 \quad (16)$$

图 11 为测压管示数与进水流道流态。测压管编号从左至右依次为 0、1、2、3、4, 测量出口内侧的测压管 2 的读数略高于其他测压管, 说明流道内侧的流速大于外侧。对相同淹没深度、不同工况时的两种进水流道进行实验, 可以观察到: 优化后的进水流道水流流态曲线光滑, 无突变、涡带等现象发生; 在流道弯曲段, 水流急剧转向, 伴随着流道过流面积的均匀收缩, 水流流速增加, 弯曲段的内侧无脱流现象或其他不良流态; 在流道出口段, 水流流态分布均匀, 流向笔直。



图 11 测压管示数与进水流道流态

Fig. 11 Pressure measuring pipe and inlet channel flow pattern

优化前后方案的方差和切向流速如图 12 所示。可以看出: 随着流量从 $0.8Q_d$ 增加到 $1.5Q_d$, 方差基本不变, 即流道流速均匀度基本不变, 原方案流道的测压管方差更小; 流道切向流速受流量的影响呈现出上升的趋势, 优化方案切向流速小于原方案, 水流平均角度更接近 90° 。流道水力损失试验结果如表 4 所示。可以看出, 流道的水力损失均随流量加大明显增加, 优化后的流道水力损失在不同工况下均小于原流道, 两种方案设计工况下的水力

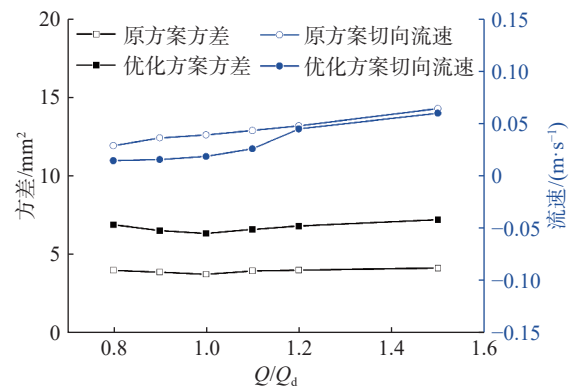


图 12 优化前后方案的方差与切向流速

Fig. 12 Variance and tangential flow rate of optimized schemes

损失分别为 18 mm 和 16 mm。根据式 (16) 换算出原型和优化模型的水力损失分别为 83.34 mm 和 74.08 mm, 与数值计算结果比较相符, 证明了数值模拟的可行性与模拟结果的可靠性。

表4 流道水力损失试验结果

Tab. 4 Test results of hydraulic loss in flow channel

Q/Q_d	水力损失/mm	
	原方案	优化方案
0.8	12	10
0.9	15	14
1.0	18	16
1.1	22	19
1.2	25	22
1.4	38	34

6 结论

1) 针对肘形流道弯曲段优化设计, 建立全新坐标系, 推导出肘形流道剖面轮廓线数值解法, 并以此方法对国内某核电厂肘形流道提出了优化设计方案, 使流道出口平均流速提高了 0.026 m/s, 流速分布均匀度降低 0.13%, 水流平均角度提高 0.034°, 水力损失降低 11.2%。

2) 通过数值模拟和试验可知, 流道过水断面的变化, 尤其是流道弯曲段的过渡变化, 对流道流态和水力损失有很大的影响, 流道进水断面变化不均匀会导致流道损失增大, 从而使机组性能下降。

3) 本文建立的全新直角坐标系得出的优化方法对肘形流道的优化提升具有很大的帮助, 同时对核电厂肘形流道的优化设计提供了有益的参考。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 泵站设计标准: GB 50265—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for pumping station design: GB 50265—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022.

[2] 黎义斌, 张帆, 郭艳磊, 等. 反应堆一回路对核主泵叶轮入流特性的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(10): 973 – 980.

LI Y B, ZHANG F, GUO Y L, et al. Influence of reactor primary circuit on inflow characteristics of reactor coolant pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(10): 973 – 980.

[3] 王为术, 甄娟, 郭嘉伟, 等. 并联循环泵站前池及吸水室整流优化 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1119 – 1126.

WANG W S, ZHEN J, GUO J W, et al. Optimization of rectification for forebay and suction chamber of parallel circulation pump station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1119 – 1126.

[4] 国家能源局. 火力发电厂循环水泵房进水流道设计规范: DL/T 5489—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for inlet channel design of circulating water pump house in thermal power plant: DL/T 5489—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.

[5] 陆林广, 张仁田. 泵站进水流道优化水力设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 60 – 62.

LU L G, ZHANG R T. Optimal hydraulic design of intake channel of pumping station[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1997: 60 – 62.

[6] 关醒凡. 现代泵技术手册 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 351 – 352.

GUAN X F. Handbook of modern pump technology [M]. Beijing: Aerospace Press, 1995: 351 – 352.

[7] 高传昌, 高余鑫, 董旭敏, 等. 簸箕形进水流道主要控制参数对水力性能的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1111 – 1118.

GAO C C, GAO Y X, DONG X U, et al. Influence of main control parameters of skip-shaped water inlet channel on hydraulic performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1111 – 1118.

[8] 储训. 肘形进水流道解析法探讨 [J]. 江苏农学院学报, 1986(1): 41 – 48.

CHU X. Numerical method for analyzing suction conduit of large pumping station[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1986(1): 41 – 48.

[9] 施伟, 李彦军, 邓东升, 等. 肘形进水流道优化设计与数值计算 [J]. 流体机械, 2009, 37(12): 19 – 22.

SHI W, LI Y J, DENG D S, et al. Optimum hydraulic design and model test for elbow inlet passage[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 19 – 22.

[10] 董雷, 张丽萍, 李宁, 等. 基于 CFD 的主要控制参数对肘形进水流道水力性能的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 57 – 61.

DONG L, ZHANG L P, LI N, et al. Study on the influence of main control parameters on hydraulic performance of elbow inlet based on CFD[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(12): 57 – 61.

[11] 陆林广, 冷豫, 吴开平, 等. 泵站进水流道内部流态模型试验方法研究[J]. *排灌机械*, 2005, 23(3): 17 – 19.

LU L G, LENG Y, WU K P, et al. Study on method for model test of flow pattern in suction box of pumping station[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(3): 17 – 19.

[12] 杨帆, 谢传流, 刘超, 等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 15 – 21.

YANG F, XIE C L, LIU C, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 15 – 21.

[13] 张驰, 李彦军, 蒋红樱, 等. 肘形进水流道水力优化仿真计算与试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(10): 860 – 866.

ZHANG C, LI Y J, JIANG H Y, et al. Numerical simulation and experiment of optimum hydraulic design for elbow inlet passage[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(10): 860 – 866.

[14] 刘志远, 王秀勇, 杜永峰, 等. 网格划分对多级离心泵水力性能计算精度的影响[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(3): 83 – 89.

LIU Z Y, WANG X Y, DU Y F, et al. Research on the influence of grid division on the hydraulic performance calculation accuracy of multistage centrifugal pump[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2021, 40(3): 83 – 89.

Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(3): 83 – 89.

[15] LI Y J, WANG F J. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(6): 705 – 711.

[16] JAFARZADEH B, HAJARI A, ALISHAHI M M, et al. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(1): 242 – 249.

[17] 谭正生, 陈扬, 林彬, 等. 核电站重要厂用水泵叶片磨损对其性能的影响[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 32 – 37.

TAN Z S, CHEN Y, LIN B, et al. The effect of blade wear on the performance of essential service water pumps in nuclear power stations[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(4): 32 – 37.

[18] 谢华, 黎臻, 刘德祥, 等. 基于三维数值模拟的柳港泵站肘形进水流道优化设计[J]. *中国农村水利水电*, 2019(9): 129 – 132.

XIE H, LI Z, LIU D X, et al. Numerical simulation and optimization design of elbow inlet channel of Liugang pumping station[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(9): 129 – 132.

[19] 赵浩儒, 杨帆, 刘超, 等. 立式轴流泵装置流道内部流动特性及消涡试验[J]. *流体机械*, 2016, 44(3): 1 – 5.

ZHAO H R, YANG F, LIU C, et al. Analysis on the Vortex flows and Vortex suppression schemes of cube-type inlet passage for pumping system[J]. *Fluid Machinery*, 2016, 44(3): 1 – 5.

[20] 郑海霞. 核电站海水循环泵进水流道试验研究[J]. *工程技术研究*, 2021, 6(16): 1 – 5.

ZHENG H X. Experimental study on inlet channel of seawater circulating pump in nuclear power plant[J]. *Metallurgical Collections*, 2021, 6(16): 1 – 5.

(责任编辑: 夏书林)

(上接第 26 页)

[15] PRADEEP P, WEI P. Heuristic approach for arrival management of aircraft in on-demand urban air mobility[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2020: 1–12.

[16] 民用航空空中交通管理规则 [EB/OL] [2023-

06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/03/content_5717885.htm.

Civil aviation air traffic management rules[EB/OL] [2023-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/03/content_5717885.htm.

(责任编辑: 饶莉)