

一体化快堆主泵水力部件轻量化技术研究

浦恩山¹, 翟晓¹, 谷继品¹, 刘思敏^{1,*}, 张旭²

(1. 中国原子能科学研究院核工程设计研究所, 北京 102413; 2. 杭州浙富核电设备有限公司, 浙江 杭州 311504)

摘要: 为满足我国核能发展和国防科技工业发展要求, 以实现国家碳中和及能源安全需求为目标, 需全面突破和掌握一体化核能系统的关键技术。一回路主泵作为一体化快堆的重要能动设备, 目前虽已实现自主化, 但其重量偏重, 为提高其经济性, 需开展轻量化研究。本文通过中俄主泵结构方案对比分析, 明确一体化快堆主泵水力部件轻量化研究的方向, 根据一体化快堆主泵的水力设计要求, 明确水力部件轻量化优化思路, 通过CFD数值模拟方法对不同吸入口数量(10个、6个和4个)的水力性能进行分析比较, 根据其分析结果, 确定了6个吸入口的水力方案为最终方案, 相较于示范快堆的10个吸入口方案, 水力部件重量降低约15%, 实现了水力部件轻量化的目标。

关键词: 一体化快堆; 主泵; 水力部件; 减重; CFD

中图分类号: TL43.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)S1-0120-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0830

Research on Lightweight Technology of Hydraulic Components for Integrated Fast Reactor Main Pump

PU Enshan¹, ZHAI Xiao¹, GU Jipin¹, LIU Simin^{1,*}, ZHANG Xu²

(1. Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Hangzhou Zhefu Nuclear Power Equipment Company, Hangzhou 311504, China)

Abstract: To meet the requirements of our country's nuclear energy development and defense technology industry development, and to achieve national carbon neutrality and energy security needs, it is necessary to comprehensively break through and master the key technologies of integrated nuclear energy systems. As an important dynamic equipment in integrated fast reactors, the primary circuit main pump has been autonomous, but its weight is too heavy. In order to improve its economy, lightweight research needs to be carried out. Through the comparative analysis of the main pump structural schemes between China and Russia, the main similarities and differences of the two main pumps were identified. Based on the weight differences of the main components, the requirement for lightweight of the hydraulic components of the integrated fast reactor main pump was clarified. According to the hydraulic design requirements of the integrated fast reactor main pump, the optimization idea for lightweight of the hydraulic components was clarified. The hydraulic performance of different numbers of suction ports (10, 6, and 4) was analyzed using CFD numerical simulation methods. On the premise of ensuring

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2025-01-17

基金项目: 中核集团集中研发项目

* 通信作者: 刘思敏

that the hydraulic performance meets the requirements, the optimization scheme was determined. According to the CFD analysis results, as the number of suction ports decreases, the hydraulic efficiency gradually decreases, and the weight also decreases accordingly. When the number of suction ports is reduced to 4, the outlet flow field is poor. Since the scheme with 10 suction ports is too heavy, and the scheme with 6 suction ports has a significant weight reduction effect at the cost of slightly sacrificing efficiency, the final design scheme was determined to be the 6-suction-port scheme.

Key words: integrated fast reactor; main pump; hydraulic components; weight loss; CFD

目前我国核能发展的重点堆型是压水堆,随着其装机容量的迅猛增加,核燃料的自主供应、长寿命核废料大量增加、后处理厂的核燃料循环运行和维护费用等问题日益突出^[1]。发展压水堆和快堆并存的“二元”核电体系可从根本上解决上述问题。

一体化核能系统技术,可有效利用²³⁸U,其裂变变的资源总量将超过所有化石能源的总和,满足我国核能发展的需求,具有天然铀近零消耗、耦合匹配压水堆、长寿命高放废物近零产生、次锕系元素高效焚烧等优点,能最大程度发挥快堆的技术优势的同时解决环境友好问题,具备重大技术创新和技术革命的特征,有望在安全性、经济性和可持续性上达到第四代核能系统的全部要求。

一体化快堆主泵是核岛重要的能动设备,其功能是驱动一回路冷却剂循环以冷却堆芯,将堆芯产生的热量传递至二回路系统,进而推动三回路的汽轮机发电。与其他堆型一回路主泵的不同之处在于:钠冷快堆长期停堆时,为保证一回路钠冷却剂的温度,同样要求其低速运行,即停堆不停泵。因此其长时间稳定安全可靠的运行对冷却堆芯、维持钠冷却剂温度及防止事故的发生极为重要。

国外针对钠冷快堆主泵的研究主要集中在有钠冷快堆运行经验的法国、俄罗斯和日本,其主泵结构经多个堆型的设计及运行迭代,已相对成熟,目前的研究方向主要是设计优化,如缩减重量、尺寸和造价,提高经济性。法国主泵的方案是提高泵的转速进而减小泵的直径,并通过取消截止阀进一步降低泵的重量和尺寸。俄罗斯的方案是优化水力部件,如简化叶轮入口和出口流道结构,采用轴向导叶代替径向导叶,并研究去除泵出口截止阀的可能性^[2]。

钠冷快堆领域,中国已在2011年建成了中国实验快堆,目前已运行多年,但其中的主泵仍靠进口,在示范快堆工程科研中我国已攻克主泵全部关键技术,实现了钠冷快堆主泵的自主化目标,其成果将应用于示范快堆2号机组中。示范快堆1号机组使用的主泵为俄罗斯供货的主泵(简称俄泵),其功能要求、性能指标、运行工况、环境条件及安装接口与2号机组主泵(简称中泵)完全一致。因两款泵的设计方不同,导致两款泵的设计方案略有不同。总体上中方的泵偏重,因此有必要开展钠泵的轻量化研究,在不影响主泵功能的情况下降低其重量和尺寸,增加主泵整体经济性。

1 中俄主泵结构方案对比

在整体结构方案上中泵与俄泵相同,均为立式、双吸、浸没式并有自由钠液位的离心泵,部件均由电机、电机支架、联轴器、可抽出部分和电控系统等组成。其中可抽出部分由上部轴承、轴承支架、机械密封、检修密封、泵盖、主轴、泵体、静压轴承、叶轮、上蜗室、下蜗室、截止阀等组成,中泵整体结构示于图1。

在具体的部件设计上两款泵略有不同,如蜗室吸入口数量中泵为10个,俄泵为4个,泵盖屏蔽材料中泵为蛇纹石混凝土,俄泵为不锈钢板,上部轴承(包括电机轴承)中泵为润滑油内循环,不需要外置油站,俄泵上部轴承润滑油为外部循环,需要外置油站,俄泵电机高度较高,中泵电机直径较大,导致电机支架直径也比俄泵电机支架大,以上部件的不同导致两款主泵重量和尺寸产生了差别。

中泵和俄泵重量差异对比列于表1(螺栓等连接件及其他小部件未在表1中列出),尺寸差异列于表2。

根据以上中泵和俄泵的对比可看到,中泵和俄泵总体尺寸差异不大,但中泵比俄泵重23.2 t,

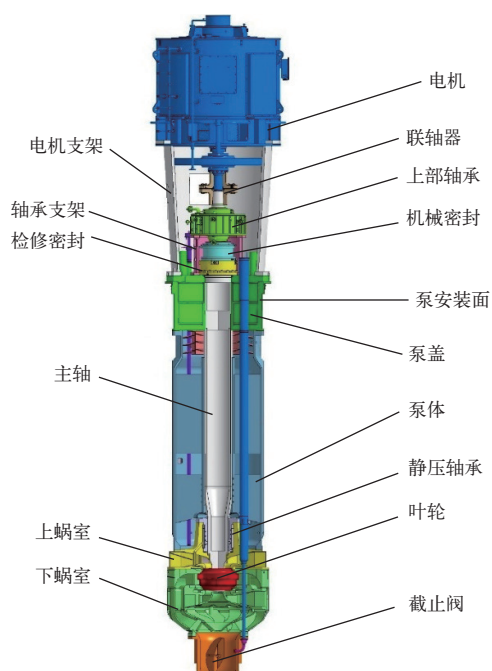


图1 中泵整体结构

Fig. 1 Chinese pump overall structure

重量差异主要集中在电机支架、泵盖、转子和蜗室上。电机支架的重量差异主要来自于两款主泵电机方案的设计差异,中泵电机直径较大,可抽出部件较长导致电机支架重量随之增加。

蜗室结构中泵和俄泵有着明显的区别,引起二者差异的主要原因是两款主泵水力方案设计不同。俄泵水力吸入口有4个,中泵水力吸入口有10个,对应的导流结构数量也不同,这也是重量增加的主要原因,其次是内部流道设计不同,中泵的导流装置较长,这也增加了一部分结构的重量。转子重量差异主要体现在中泵轴较粗,这和整泵的轴系设计相关。泵盖重量差异主要是二者的设计尺寸、填充物等不同导致。

本文着重对一体化快堆主泵水力部件(包括叶轮、蜗室、导叶)开展优化设计,以轻量化为目标,在满足一体化快堆主泵水力设计的前提下,降

表1 中俄主泵重量对比

Table 1 Comparison of Chinese and Russian main pumps

| 序号 | 部件 | 中泵重量/t | 俄泵重量/t | 中泵与俄泵重量差/t |
|------|----------|--------|--------|------------|
| 1 | 电机 | 45.98 | 48 | -2.02 |
| 2 | 电机支架 | 17.8 | 11.1 | 6.7 |
| 3 | 联轴器 | 1.4 | 0.4 | 1 |
| 4 | 可抽出部件 | 116 | 96.2 | 19.8 |
| 4.1 | 泵盖 | 32.6 | 30.65 | 1.95 |
| 4.2 | 转子 | 10.16 | 7.76 | 2.4 |
| 4.3 | 泵体 | 28.38 | 29.5 | -1.12 |
| 4.4 | 静压轴承 | 1.6 | 1 | 0.6 |
| 4.5 | 上蜗室 | 10.03 | 9.08 | 0.95 |
| 4.6 | 下蜗室(含导叶) | 18.92 | 13.307 | 5.613 |
| 4.7 | 轴封 | 0.9 | 0.3 | 0.6 |
| 4.8 | 停车密封 | 0.85 | 0.4 | 0.45 |
| 4.9 | 上部轴承 | 2.74 | | |
| 4.10 | 轴承支架 | 1.8 | 1.55 | 0.25 |
| 4.11 | 截止阀装配 | 3.942 | 3.01 | 0.932 |
| | 总重 | 181.7 | 158.5 | 23.2 |

表2 中俄主泵尺寸对比

Table 2 Comparison of Chinese and Russian main pumps sizes

| 参数 | 中泵尺寸 | 俄泵尺寸 | 中泵与俄泵尺寸差 |
|-----------|----------|--------|----------|
| 总高, mm | 17 319.5 | 17 531 | -211.5 |
| 安装面直径, mm | 2 645 | 2 643 | 2 |

低水力部件的重量。

2 主泵水力部件轻量化优化思路

由于一体化快堆系统运行需求,系统上尚需主泵截止阀,故主泵出口处的截止阀仍需保留,受主泵安装条件的影响,为避免共振,主泵的转速也不能提高,因此主泵水力部件轻量化需从水力部件自身的结构出发开展优化工作。水力部件的叶轮仍采用双吸叶轮(图2),为实现轻量化目标,设

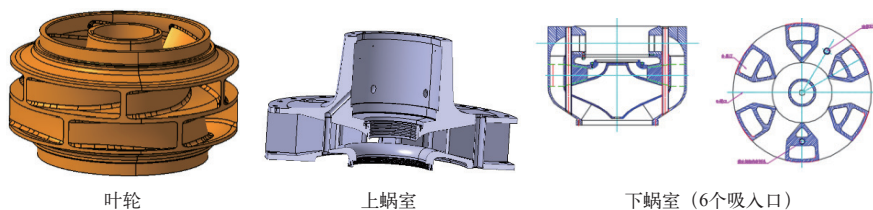


图2 主泵水力部件

Fig. 2 Hydraulic components of main pump

计上减少上下蜗室的吸入口数量,优化流道结构,在满足结构强度和水力性能的情况下,适当降低导流结构的厚度,以降低整个水力部件的重量^[3]。通过 CFD 数值模拟^[4]方法对不同吸入口数量(10个、6个和4个)的水力性能进行分析,在确保水力性能满足要求的前提下,确定优化方案^[5-6]。水力设计要求列于表3。

表3 主泵水力设计要求

Table 3 Hydraulic design requirements for main pump

| 项目 | 数值 | |
|----------|-------------------------|------------------|
| 水力性能 | 额定流量, m ³ /h | 14 907 |
| | 额定扬程, m | 72 ⁺² |
| 水力设计输入条件 | 水力效率, % | ≥85 |
| | 额定运行时入口处钠温, °C | 358 |
| | 额定转速, r/min | 742 |
| | 额定转速下泵气腔压力(表压), MPa | 0.05 |

3 数值模拟分析

3.1 泵几何造型及边界条件

根据一体化快堆主泵水力设计要求,对水力

部件结构参数进行初算,并据此建立三维模型^[7],通过 CFD 数值模拟方法对初始模型进行计算分析,并在此基础上对初始模型进行优化。经过对初始方案的几何参数的不断修正,确定了3种水力方案的水力模型,其相关参数列于表4。

除截止阀外,其余部件均采用高精度六面体网格进行网格划分,总网格数约900万,网格划分示于图3。对其中6个吸入口的模型进行了网格无关性分析,以扬程为监测结果。当网格总数为900万时,扬程为76.02 m;当网格总数为1 027万时,扬程为78.72 m;当网格总数为1 384万时,扬程为79.67 m。采用1 027万网格和900万网格计算得到的扬程偏差在5%以内,故采用总数为900万进行后续数值模拟。计算中流体介质为358 °C的液态金属钠,在额定工况(转速742 r/min)下进行不同流量的模拟计算。

使用 ANSYS CFX 对泵过流部件内流动情况进行数值模拟^[8-9],入口边界为水平进口断面,指定总压为进口边界条件,出口为流量出口,固壁边界:光滑无滑移。采用 SST $k-\omega$ 紊流模型^[10],收敛最大残差小于 10^{-4} 。

表4 泵叶轮及导叶尺寸

Table 4 Dimensions of pump impellers and guide vanes

| 部件及参数 | 数值 | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|
| | 10个吸入口 | 6个吸入口 | 4个吸入口 | |
| 叶轮(双吸式) | 叶片数 | 6 | 6 | 6 |
| | 叶轮进口直径, mm | 685 | 690 | 690 |
| | 叶轮外径, mm | 1 145 | 1 160 | 1 160 |
| | 单侧叶轮出口高度, mm | 107 | 108 | 108 |
| | 轮毂直径, mm | 372 | 372 | 372 |
| 径向导叶 | 叶片数 | 10 | 10 | 10 |
| | 进口直径, mm | 1 350 | 1 350 | 1 350 |
| | 出口直径, mm | 1 805 | 1 805 | 1 805 |

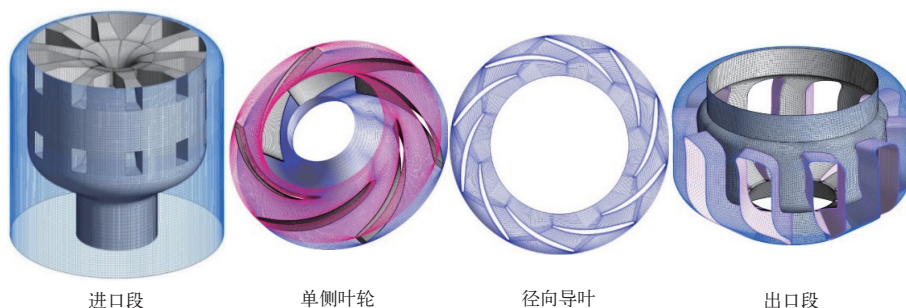


图3 各部件的网格划分

Fig. 3 Mesh division of each component

3.2 泵外特性分析

在钠介质条件下,通过对泵在额定转速、多个不同流量下运行时的内部流场进行数值模拟,得

出了泵的工作特性曲线,示于图4,通过计算得到额定工况下泵的扬程、效率和功率,列于表5。经核算后,3种水力方案均满足设计要求。

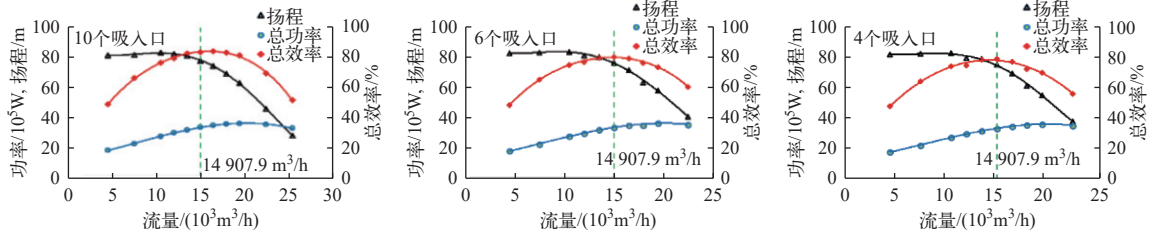


图4 泵性能预测曲线

Fig. 4 Pump performance predicting curve

表5 泵水力特性值

Table 5 Pump hydraulic characteristics

| 特性项 | 特性值 | | |
|----------|--------|-------|-------|
| | 10个吸入口 | 6个吸入口 | 4个吸入口 |
| 扬程, m | 76.9 | 76.02 | 75.69 |
| 水力效率, % | 90.8 | 87.18 | 86.71 |
| 总效率, % | 82.57 | 79.71 | 79.29 |
| 额定功率, kW | 3277 | 3356 | 3359 |

内部压力分布呈现轴对称分布,且进口断面的流速分布均匀,3种方案泵叶轮入流条件均较好,如图5~7所示。

在额定工况下,3种叶轮内部流动顺畅、无脱流,表面压力分布均匀,压力沿叶片进口向出口均匀增加,压力梯度变化均匀,见图8~10。由叶轮速度矢量分布图(图11)可知,叶片头部基本实现无撞击进口,头部具有较小的冲角,在保证叶轮获得较好的水力性能的同时具有较好的抗汽蚀性能,进出口流动顺畅,整体流动状况良好。导叶附近流态良好,在导叶中部截面处,导叶头部均能实现无撞击进口,说明径向导叶与叶轮具有良好的相互匹配关系,水力性能较好,见图12、13。

3.3 内部流动分析

钠冷却剂流经泵和泵支撑间隙后进入上下蜗室,再进入叶轮,上下蜗室内为收缩型流道,有利于减小泵进口流动扰动及不均匀影响^[1]。进口段

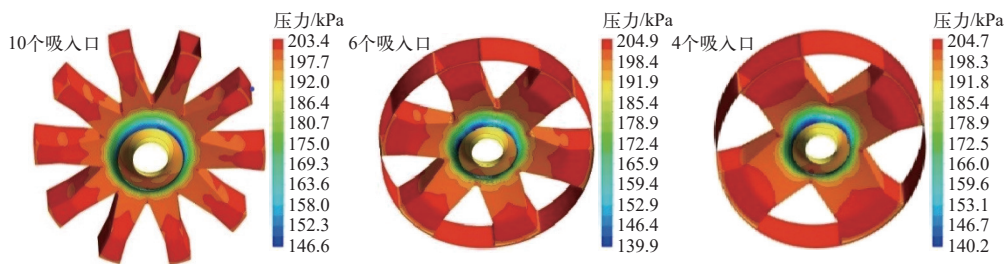


图5 上蜗室压力分布

Fig. 5 Pressure distribution in superior fossa

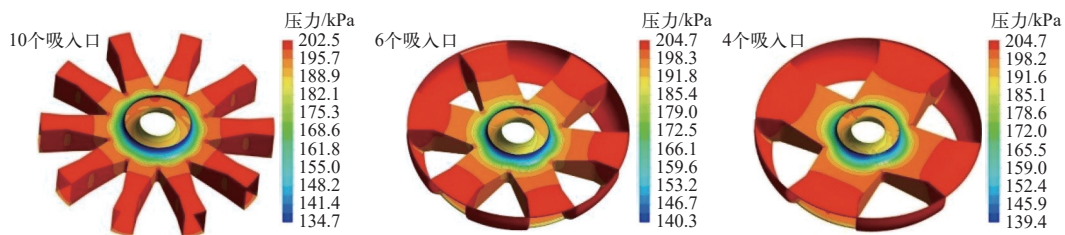


图6 下蜗室压力分布

Fig. 6 Pressure distribution in lower fossa

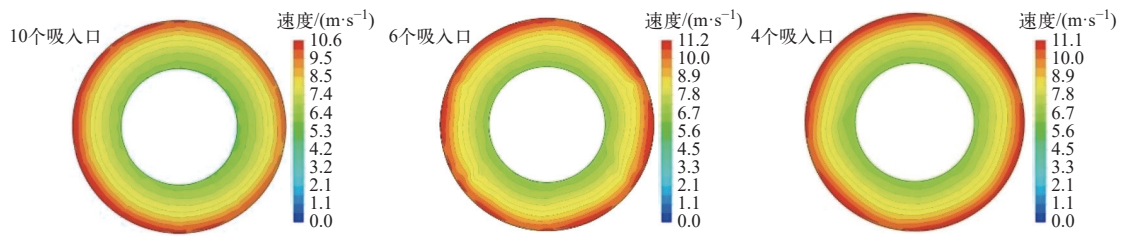


图7 叶轮速度分布

Fig. 7 Impeller velocity distribution

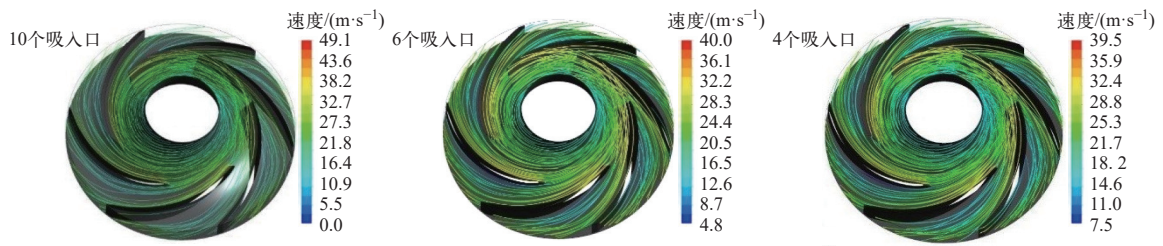


图8 上侧叶轮内部流线分布

Fig. 8 Internal streamline distribution of upper impeller

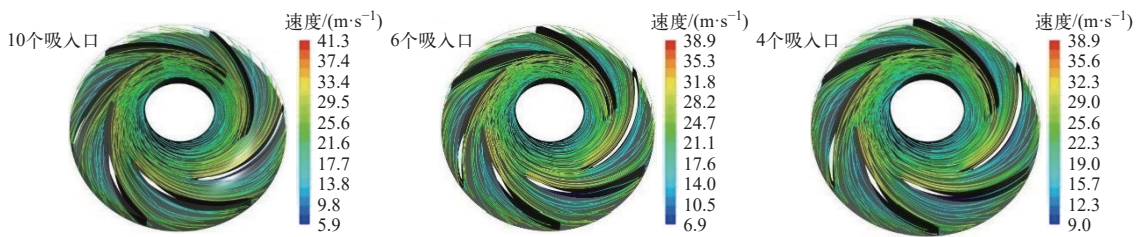


图9 下侧叶轮内部流线分布

Fig. 9 Internal streamline distribution of lower impeller

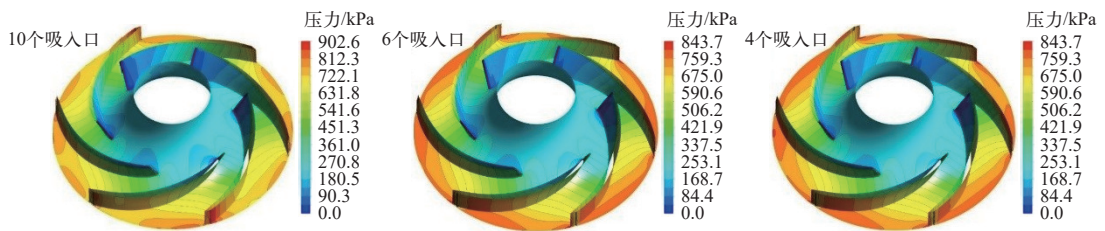


图10 叶轮压力分布

Fig. 10 Impeller pressure distribution

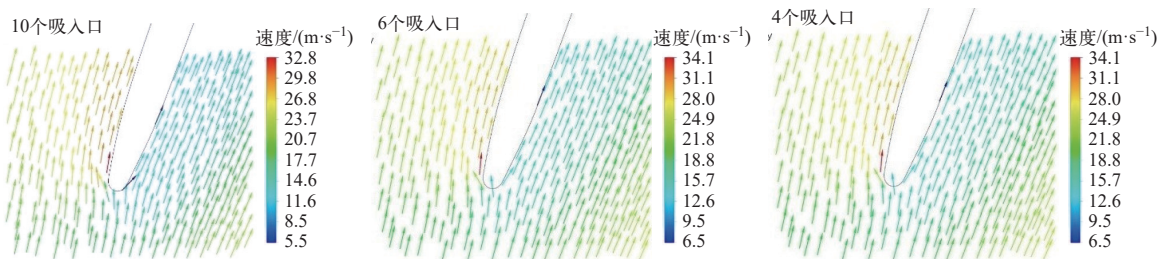


图11 叶片头部速度矢量分布

Fig. 11 Blade head vector distribution

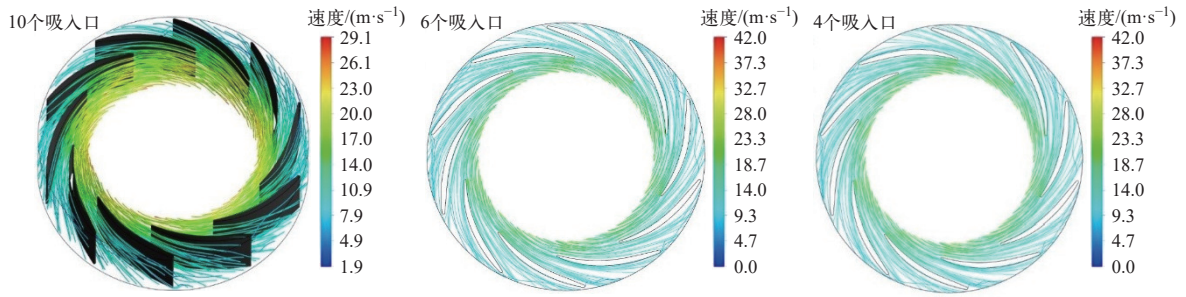


图 12 径向导叶内部流态
Fig. 12 Radial guide vane flow pattern

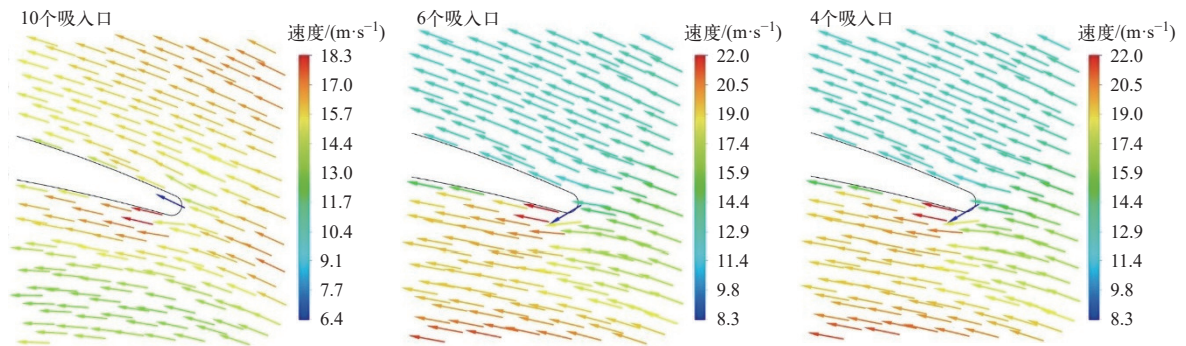


图 13 径向导叶头部速度矢量分布
Fig. 13 Radial guide vane head vector distribution

由于蜗室吸入口数量改变, 出口段的几何形状也发生了变化, 吸入口数量在 10 个和 6 个时, 导叶附近流态良好, 出口段内部无明显脱流和漩涡产生, 流动状况良好。当吸入口数量变为 4 个后,

在矩形吸入口后侧存在脱流现象, 4 个吸入口流场在止回阀下游侧也有明显脱流, 具体示于图 14。不同吸入口数量的水力计算结果和结构重量列于表 6。

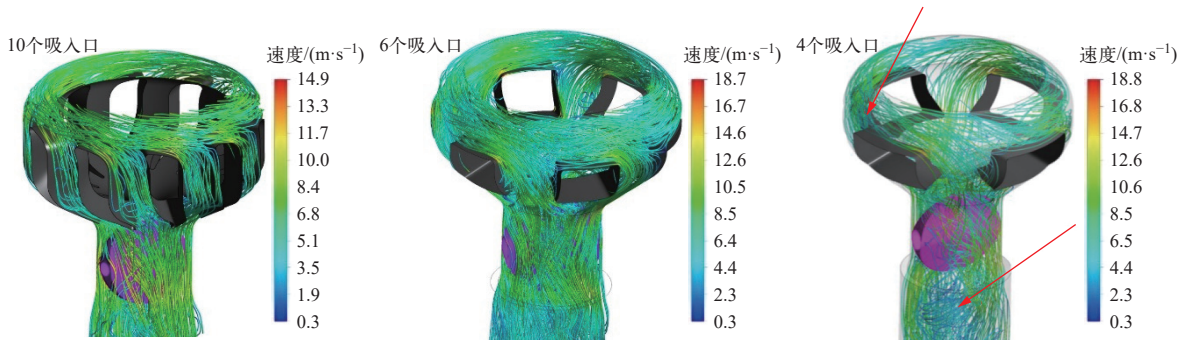


图 14 出口段流场分布
Fig. 14 Flow field distribution in outlet section

4 最终优化方案

通过对 10 个、6 个、4 个吸入口的水力部件的水力性能对比分析可知, 随着吸入口的减少, 水力效率逐步降低, 水力部件的重量也依次减小。但是在水力部件吸入口从 6 个改到 4 个后, 水力效率和水力部件重量的降低幅度大幅减小, 同时

4 个吸入口方案在水力部件出口处流场较差。

综上, 6 个吸入口方案在略有牺牲效率的情况下, 有明显减重效果, 相较于 10 个吸入口的方案重量降低约 10%。与示范快堆水力部件相比, 一体化快堆主泵水力部件在流量、扬程均比示范快堆大的情况下, 重量仍有降低, 降低约 15%。因

表6 不同吸入口方案的水力部件性能对比表

Table 6 Performance comparison table of hydraulic components for different suction schemes

| 性能项 | 不同吸入口数量下性能值 | | |
|-----------------------|-------------|--------|--------|
| | 10个 | 6个 | 4个 |
| 流量, m ³ /h | 149.07 | 14.907 | 14.907 |
| 扬程, m | 76.9 | 76.02 | 75.69 |
| 额定工况效率, % | 82.57 | 79.71 | 79.29 |
| 上蜗室重量, t | 10.3 | 8.2 | 7.9 |
| 下蜗室重量, t | 16.2 | 15.3 | 14.5 |
| 叶轮重量, t | 1.24 | 1.24 | 1.24 |
| 水力部件总重, t | 27.74 | 24.74 | 23.64 |

此,一回路主泵水力方案选择6个吸入口的方案开展后续工作。

5 结论

1) 通过中俄主泵结构方案对比分析,找出了两款主泵的主要异同点,根据主要部件的重量差异,明确了一体化快堆主泵水力部件轻量化需求。

2) 根据一体化快堆主泵的水力设计要求,明确了水力部件轻量化优化思路,通过CFD数值模拟方法对不同吸入口数量(10个、6个和4个)的水力性能进行分析,在确保水力性能满足要求的前提下,确定优化方案。

3) 根据CFD分析结果,随着吸入口数量的减少,水力效率逐渐降低,同时重量也依次减少,吸入口数量减少到4个时出口流场较差。由于10个吸入口方案重量过高,而6个吸入口的方案在略有牺牲效率的情况下,有明显减重效果,最终确定设计方案为6个吸入口方案。

4) 后续将适时开展水力模型试验,结合试验结果固化一体化快堆主泵水力部件结构。同时还将对主泵的电机支架、泵盖等部件继续开展轻量化研究,进一步降低主泵整体重量,提高其经济性。

参考文献:

[1] 张东辉,王松平,代智文. 国际快堆发展综述[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(增刊): 265-270.
ZHANG Donghui, WANG Songping, DAI Zhiwen. Review on development of sodium-cooled fast reactor worldwide[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(Suppl.): 265-270(in Chinese).

[2] IAEA. Status of liquid metal cooled fast reactor technolo-

gy, IAEA-TECDOC-1083[R]. Vienna: IAEA, 1999.

- [3] 费川,李坚,胡文新,等. 核主泵水力优化技术与水力稳定性研究进展[J]. 大电机技术, 2024, 295(3): 85-95.
FEI Chuan, LI Jian, HU Wenxin, et al. Research progress on hydraulic optimization design technology and hydraulic performance of reactor coolant pump[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2024, 295(3): 85-95(in Chinese).
- [4] 李天斌,郭喜安,龙云. 小型堆核主泵内部流动特性数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(5): 433-439, 455.
LI Tianbin, GUO Xi'an, LONG Yun. Numerical calculation of internal flow characteristics of small modular reactors coolant pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(5): 433-439, 455 (in Chinese).
- [5] 钟少伟. 基于代理模型的核泵水力性能优化设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [6] 龙云,袁寿其,朱荣生,等. 核主泵内部流动研究现状与技术发展综述[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(11): 1081-1097.
LONG Yun, YUAN Shouqi, ZHU Rongsheng, et al. Review on research status of internal flow and technological development of reactor coolant pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(11): 1081-1097(in Chinese).
- [7] 梁江涛. CEFR 全厂断电事故工况下一回路自然循环特性三维数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [8] 张钰浩,夏子涵,梁江涛,等. 基于一体化三维数值模拟的中国实验快堆冷钠池及其堆内构件热工特性分析[J]. 核科学与工程, 2020, 40(3): 499-507.
ZHANG Yuhao, XIA Zihan, LIANG Jiangtao, et al. Thermal hydraulic characteristics analysis on cold sodium pool and its internal components in CEFR based on three-dimensional integrated numerical calculation[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(3): 499-507(in Chinese).
- [9] 马翔凤. 一台一回路泵停运非对称工况下池式钠冷快堆三维瞬态热工水力特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [10] BHUYAN P, GHOSH S. Influence of rotor speed, discharge pressure, and clearance size on the unsteady flow dynamics and heat interaction of roots blower[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, doi:10.1007/s40430-020-02729-048.
- [11] NATESAN K, VELUSAMY K. Coupled system dynamics and computational fluid dynamics simulation of plant transients in sodium cooled fast reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 342: 157-169.