

引用格式: 罗贤勇, 施海云, 吴家凯. 海上浮动式核电站汽轮发电机组方案研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 1-8. LUO X Y, SHI H Y, WU J K. Type selection and technical characteristics of steam turbine generator units for floating nuclear power plant [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 1-8. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.09.

# 海上浮动式核电站汽轮发电机组方案研究

罗贤勇<sup>✉</sup>, 施海云, 吴家凯

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 浮动式核电站具有可移动, 灵活布置, 受地震, 海啸影响更小, 不占用陆地面积, 受厂址条件影响小等优点, 可有效支撑海上资源开发和海岛能源供应, 是当今核能利用的热点方向之一。汽轮发电机组作为常规岛最重要的设备, 它的结构型式、参数选择直接影响到电站的安全稳定运行。[方法] 文章以 ACP100S 反应堆为基础, 从汽轮机排汽方向、轴系数量、背压、末级叶片、再热参数、回热级数、发电机冷却方式方面, 论述海上浮动核能平台汽轮发电机组技术方案。[结果] 推荐选用单轴、下排汽、节流配汽、1 个单流高压缸模块和 1 个单流低压缸模块组成的汽轮机; 低压缸叶片采用 1200 mm 长叶片, 热力方案为 1 级再热 4 级回热, 凝汽器采用单流程, 发电机选用全空气冷却。[结论] 研究结果可为后续浮动式核电站系统设计以及汽轮发电机组相关设计参数提供参考。

**关键词:** 核能; 浮动式电站; ACP100S; 汽轮发电机组; 空冷发电机

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0001-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.09

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Type Selection and Technical Characteristics of Steam Turbine Generator Units for Floating Nuclear Power Plant

LUO Xianyong<sup>✉</sup>, SHI Haiyun, WU Jiakai

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The floating nuclear power plants have the advantages of mobility, flexible layout, less impact from earthquakes and tsunamis, no occupation of land area, and less impact from site conditions. It can effectively support offshore resource development and island energy supply, and is one of the hot topics in nuclear energy utilization today. As the most important equipment in conventional islands, the structural type and parameters of steam turbine generator sets directly affect the operation safety and stability of power plants. [Method] Based on the ACP100S reactor, this paper discussed the technical scheme of offshore floating nuclear energy platform turbine generator unit from the aspects of turbine exhaust direction, number of shaft systems, back pressure, final stage blades, reheat parameters, reheat stages, and generator cooling method. [Result] It is recommended to choose a steam turbine consisting of a single shaft, downward exhaust, throttling steam distribution, one single flow high-pressure cylinder module, and one single flow low-pressure cylinder module, with 1200 mm long low-pressure cylinder blades, thermal scheme of 1-stage reheating and 4-stage backheating, single-process condenser, and air-cooled generator. [Conclusion] The results can provide reference for the subsequent design of floating nuclear power plant systems and related design parameters of steam turbine generator.

**Key words:** nuclear power; floating power plant; ACP100S; steam turbine generator units; air-cooled generator

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

### 0 引言

海上浮动核电站, 是利用海上浮动平台(如船舶)

建造的可移动的核电站, 是小型核电站与船舶工程的有机结合<sup>[1]</sup>。它可以在不同的海域灵活部署, 能为海洋油气开采和偏远岛屿提供安全、有效的能源供

给,也能用于大功率船舶和海水淡化领域,具有广阔的应用前景,是当今核能利用的热点方向之一<sup>[2]</sup>。

目前国际上海上浮核电站共有 4 种类型:圆柱式、重力坐底式、下沉式、船型式,其中前 3 种类型均为研究机构的概念设计,存在一定的技术风险,而现有实际应用的核动力商船与浮动核电站均为船型式<sup>[3]</sup>。俄罗斯是最先实现工程应用的国家,其建造的“罗莫诺索夫院士号”浮动式核电站于 2018 年投入运行<sup>[4]</sup>,其他国家目前均处于研究阶段<sup>[5-8]</sup>。

我国的海上浮核电站处于初始建设阶段,虽起步相对于其他国家较晚,但国内对海上浮动核电站的经济价值已形成共识<sup>[1]</sup>。目前,中核集团、中广核集团都不同程度在研发和推广浮动式小型核反应堆。其中,中核集团推出的是 ACP100S 轻水堆,采用国际上小型堆主流设计,采用能动加非能动安全系统,半潜式深吃水设计,海水作为最终热阱,单堆热功率 385 MW。中广核集团研发的 ACPR50S 轻水堆采用全非能动安全系统,半潜式深吃水设计,海水可作为最终热阱,单堆热功率 200 MW<sup>[5]</sup>。

海上浮动式核电站依然采用蒸汽动力循环发电,汽轮发电机组是常规岛最重要的设备。由于浮动平台具有空间狭小、倾斜、摇摆、振动等特点<sup>[9-10]</sup>,汽轮发电机组的方案选择与陆上电站机组有较大区别,文章以 ACP100S 反应堆为基础,论述海上浮动核能平台汽轮发电机组方案选择要点,可为后续工程实践提供参考。

## 1 设计条件

某项目采用 ACP100S 堆型,建造一艘海上浮动式核能供应平台,停靠指定海域,为目标市场提供稳定能源。

汽轮发电机组设计输入如下:

- 1) 反应堆设计额定热功率为 385 MW, 额定电功率为 125 MW, 设计寿命 40 年, 换料周期 24 个月;
- 2) 主蒸汽压力 4.5 MPa(a), 主蒸汽温度 294 °C, 主汽流量 596.8 t/h;
- 3) 主给水温度 140 °C, 主给水压力 6.2 MPa(a);
- 4) 凝汽器采用海水直流循环冷却, 循环水平平均水温为 16.05 °C;
- 5) 根据船体的总体布置方案, 汽轮发电机组尺寸应在长×宽×高=18.28 m×10.97 m×15 m 范围附近

为宜;

海上浮动平台工作条件特殊,汽轮发电机组的结构不能照搬陆上固定电站的模式,必须因地制宜相应作出特殊的设计或改进。海上平台汽轮发电机组外形尺寸受平台制约很大,通常是决定方案是否可行的主要因素之一。另外,海上平台汽轮机组还需适应倾斜、摇摆、振动、船体变形、等海洋条件。因此,海上平台汽轮发电机组的设计应优先满足装船适应性要求(尺寸、抗摇摆、抗倾斜等),同时兼顾发电效率。

## 2 汽轮发电机组方案选择分析

### 2.1 汽轮机排汽方向

汽轮机排汽方向应由船体整体布置方案决定。常见的排汽方向有轴排、侧排和下排三种:

轴排:凝汽器布置在低压缸尾部,发电机布置在机头。此方案能显著减小机组的高度尺寸,但机组长度至少增加 9~10 m,高度方向空间没有充分利用,布置上难以实现。且由于发电机布置于机头,挤占 MSR 的空间,将会导致再热蒸汽管道延长,空间利用率低。因此,不推荐采用轴排。

侧排:侧排汽轮机能显著减小机组的高度尺寸,但机组宽度尺寸大大增加,而高度方向空间利用率低。国内汽轮机厂对侧排技术掌握的程度不同,某些汽机厂侧排机组没有或很少运行业绩,招标时可能存在排他性。因此,不推荐采用侧排。

下排:下排汽方案是经典的布置形式,其长宽尺寸适中,高度空间能充分利用,更容易满足本项目船体总体布置要求。

因此,推荐采用下排汽轮机。

### 2.2 轴系数量

对于 125 MW 等级的汽轮发电机组可采用单轴和双轴(高压缸和低压缸分别驱动一台发电机平行并排布置)两种布置方案,对比情况见表 1。

由表 1 可以看出,双轴汽轮机虽然具有发电可靠性较高,可能实现更低背压的优点,但机组尺寸不满足船体布置要求,并且带来了系统复杂、设备数量多、投资大、控制复杂的缺点。对于船用发电系统应优先考虑平台对设备尺寸的限制条件并以系统简单、设备可靠、体积轻巧为优先。因此,推荐采用单轴方案。

表1 单轴和双轴汽轮发电机组对比

Tab. 1 Comparison between single- and double-shaft steam turbine generator sets

对比项	单轴	双轴
汽轮机	1个通流模块,总设备数少,重量轻	2个通流模块,总设备数多,油系统及轴封系统配套更多,重量重
发电机	数量1,功率125 MW等级,部件相对少,总重较轻	数量2,功率55~75 MW等级,部件相对多,总重较重多(依据陆上对比经验,双轴机组高10~23%,且还未考虑土建、安装导致的总体造价增加)
总投资	少	
机组效率	相同背压下效率相当,但双轴可采用双流低压缸可实现更低背压,此时双轴效率稍高	
机组尺寸	窄长型,可满足船体总体布置要求	宽短型,不能满足船体总体布置要求
轴系配套	单轴2根转子,4个支持轴承,1个推力轴承	双轴4根转子,8个支持轴承,2个推力轴承
机组布置	轴向布置难度大,重心居中	轴向布置难度小,横向布置难度大,重心偏离横向中部,不利于横倾横摇
机组运行和控制	机组启动控制及超速保护相对简单	机组启动控制及超速保护较复杂
发电可靠性	任一故障导致机组全停概率相对高	任一故障导致机组全停概率相对低

### 2.3 汽轮机背压和末级叶片

较低的汽轮机背压可以提高发电效率,但将使凝汽器换热面积增大,凝汽器总体积增大;另外,较低的排汽背压也导致排汽容积流量增加,需要采用更长的低压末级叶片或增加排汽缸个数。这二者都会导致低压缸和凝汽器总尺寸增大,增加布置难度。因此背压不是越低越好,需要综合考虑经济性和装船适应性。

本项目机组尺寸应在长×宽×高=18.28 m×10.97 m×15.00 m 范围附近,如果采用双流低压缸方案,机组长度约为26~27 m,大大超过了尺寸限制,因此机组需采取紧凑化设计,选用长叶片+单流低压缸方案,以尽可能减小机组几何尺寸。

目前国内三大汽轮机厂全转速湿冷汽轮机叶片资料见表2。三大汽轮机厂1200 mm级叶片排汽面积分别为11.7 m<sup>2</sup>、11.57 m<sup>2</sup>、11.3 m<sup>2</sup>,计算取11.57 m<sup>2</sup>。

根据排汽量、排汽余速,利用下式计算排汽面积。

$$F = \frac{G_V}{C} \quad (1)$$

表2 国内三大汽轮机厂全速汽轮机叶片资料

Tab. 2 Full speed steam turbine blades of three major domestic steam turbine manufacturers

制造商	叶片长度/mm	实际排汽面积/m <sup>2</sup>
东方汽轮机厂	909	7.38
	1016	8.8
	1092	10.11
上海汽轮机厂	1200	11.7
	905	7.5
	1050	9.2
	1146	10.96
	1220	11.57
哈尔滨汽轮机厂	900	7.4
	977	8.38
	1000	8.48
	1040	8.91
	1220	11.3

式中:

$F$  ——总排汽面积。

$G_V$  ——排汽容积流量,根据质量排汽量和排汽比容计算,质量排汽量约为430 t/h。

$C$  ——排汽余速,一般可能的范围:180~300 m/s之间,常用的范围:210~260 m/s之间。

代入公式(1)算出1200 mm叶片单流低压缸排汽比容范围为20.3416~25.185 m<sup>3</sup>/kg,按10%湿度反算背压范围为5.038~6.32 kPa,此时末级叶片的排汽余速才落在合理的范围内。

不同于陆上核电站,船用汽轮发电机组不仅要考虑经济性,更重要的是需满足装船要求。应优先考虑平台对设备尺寸的限制条件,在经济性和装船要求有冲突的情况下,适当牺牲经济性是必要的。

因此,汽轮机背压定为6 kPa。根据汽轮机厂提供的资料,机组总尺寸为长×宽×高=20.4 m×10.122 m×16 m,与尺寸很接近,可满足布置要求。

### 2.4 再热参数的选择

分缸压力将影响汽轮机效率,根据核电汽轮机经验数据,分缸压力与汽轮机初始主蒸汽压力的比值为0.05~0.2之间时,汽轮机效率相对较高。

分缸压力的选择也会影响MSR的总体尺寸,压力高低与MSR总体尺寸呈负相关关系。

此外,分缸压力的选择还显著影响高压缸及低压缸末几级的蒸汽湿度,分缸压力小,高压缸出口湿

度增大, 低压缸出口湿度减小; 分缸压力大, 其结果相反; 通常情况下, 高压缸排汽湿度控制在 10% 左右为宜, 低压缸排汽湿度在 12% 左右为宜。

综合上述所有因素, 本机组高压缸排汽压力取 0.447 MPa。此时压比值约为 0.1, 汽轮机相对效率较高; 此压力下 MSR 的总体尺寸适宜, 可满足布置要求; 高压缸排汽湿度约 9%, 低压缸排汽湿度约 12%, 都在理想值范围内, 各项参数达到一个较为合理的平衡点。

## 2.5 MSR 再热级数

如果工作蒸汽在汽轮机内从起始点直接膨胀到末级排汽压力, 则末级湿度将达到 20% 以上, 如此高的湿度会造成很大的能量损失, 更重要的是会在蒸汽流道中形成剧烈侵蚀, 危及机组安全。为了降低低压部分的湿度并防止上述影响出现, 机组必须采取除湿措施。本项目在高压缸后设置汽水分离再热器(MSR), 虽然消耗一定量的主蒸汽用于再热, 但再热后低压缸的缸效将显著提高, 其出力收益将大于再热消耗的未做功蒸汽。

常规陆上核电站为了获得更高效率, MSR 通常采用二级再热, 第一级加热蒸汽来自高压缸抽汽, 第二级加热蒸汽来自阀前主蒸汽, 再热蒸汽被加热至更高温度, 相比一级再热, 虽然出力有些许收益, 但高温再热蒸汽容积流量显著增加, MSR 总体尺寸及汽缸低压进汽口尺寸增加较多, 增加机组总体布置和管道布置难度。而且一级再热, 低压缸排汽湿度已经在合理范围内。因此, 推荐设置一级再热 MSR, 加热汽源来自高压缸抽汽。

## 2.6 回热级数的选择

给水从凝汽器至核岛约 104 °C 温升, 高压回热+除氧+低压回热总级数 3~4 级较为适宜。减少级数则每级回热温升太高, 经济性差; 增加级数则每级温升过小, 效率提高很有限, 反而增加设备, 投资增大布置困难。

除氧器除氧效果和除氧压力成正相关性, 大气式除氧器含氧量通常为 7~15 ug/L, 而高压除氧器含氧量可达 <5 ug/L。因此, 应尽量选高压除氧。

除氧器压力不宜低于 0.2 MPa(a) (对应饱和温度 120 °C), 给水温度为 140 °C, 预留的温升太小, 因此, 高压缸只能设置一级抽汽, 要么高压回热抽汽, 要么除氧器抽汽。

本机组高压缸排汽压力为 0.447 MPa(a), 对应饱和和温度 147 °C, 如果要设置高压回热, 则要求除氧器工作温度降至 140 °C 以下并留出足够的温升空间, 此时除氧器抽汽只能从低压缸取汽。适宜的回热方案有 3 个:

方案一: 高压缸 1 级除氧抽汽, 低压缸 2 级回热。除氧效果最好。混合式加热器效率高于表面式加热器, 对高品位蒸汽利用效果强于方案二, 在其他条件相同前提下机组循环效率可略高于方案二。

方案二: 高压缸 1 级回热, 低压缸 1 级除氧抽汽和 1 级低压回热。设置高压加热器, 相比方案一, 高压加热器成本高、故障率高。

方案三: 高压缸 1 级回热, 低压缸 1 级除氧抽汽和 2 级低压回热。效率最高, 由于汽轮机除主汽进汽外其他抽送汽管道都在下半缸, 目前单排汽方案下低压排汽缸轴向尺寸比较短, 开 3 个抽汽孔同时布置 3 级抽汽管道很困难。

因此, 推荐方案一的回热设置——高压缸 1 级除氧+低压缸 2 级低压回热, 不设高压回热。

## 2.7 汽轮机配汽方式

轮机配汽方式应根据机组的设计要求、经济性要求、调节特性、运行方式等综合因素考虑。

反应堆为 Mode-A 运行模式, 具有负荷跟踪能力。机组基本以额定负荷运行, 对该工况经济性要求高, 根据此特点, 选择节流配汽的方式。节流配汽通常用于带基本负荷的机组, 节流配汽的主要优点是不设调节级, 全周进汽, 级效率高, 在额定负荷时阀门全开, 压损小, 机组经济性好。

## 2.8 凝汽器单双流程

为了方便循环水系统管道布置和循环水取排水口尽量远离<sup>[12-13]</sup>, 推荐凝汽器循环水进出水口位于船体两侧, 凝汽器采用单流程设计<sup>[14]</sup>。

## 2.9 发电机冷却方式

通常, 汽轮发电机采用的冷却介质有空气、氢气和 水。按照机内冷却介质的不同可以分为全空气冷却、全氢气冷却、双水内冷、水与其它冷却介质的混合冷却, 通常在大型汽轮发电机中使用的水氢氢冷却就是两种冷却介质的使用。

氢冷或水氢冷发电机的优点是冷却效果好, 冷却能力强。据此设计出的发电机比相同容量的空冷发电机体积小, 重量轻。但是采用氢冷或水氢冷的

冷却方式,需要增加氢气控制系统、密封油控制系统和定子冷却水系统。辅助设备多,系统复杂,占空间大。而且氢气的泄漏在船上封闭环境下有氢爆风险。因此本机组不推荐氢冷或水氢冷发电机。

而对双水内冷发电机,由于业界对用水冷却发电机转子的安全性问题还存在争议,且双水内冷发电机只有上海电气生产,因此本机组不考虑双水内冷发电机。

全空冷发电机相比氢冷和水冷虽然尺寸稍大,但结构简单,无需附加冷却介质,无需辅助系统,占空间小,没有泄露、氢爆问题,特别适合在海上浮动平台上使用。目前全空冷发电机最大可做到350 MW,容量可满足本机组要求。推荐采用全空冷发电机。

### 3 结论

海上浮动核电站工作条件特殊,汽轮发电机组的结构不能照搬陆上固定电站的模式,必须根据实际情况相应作出特殊的设计或改进<sup>[15]</sup>。

通常,海上平台汽轮发电机组的设计应优先满足装船适应性要求(尺寸、抗摇摆、抗倾斜等)<sup>[20]</sup>,兼顾发电效率。文章基于ACP100S堆型,从尺寸、布置、热力方案、发电机冷却方式等方面对海上浮动式核电站汽轮发电机组的设计要点进行分析,推荐汽轮发电机组方案为:

1)单轴、下排汽,由1个单流高压缸模块和1个单流低压缸模块组成,采用1200 mm末级叶片,排汽背压6 kPa;

2)高压缸排汽压力取0.447 MPa(a),机组采用1级再热+2级低压回热+1级除氧的热力方案,不设高压回热;

3)凝汽器采用单流程设计,发电机选用全空气冷却。

汽轮发电机组主要技术参数见附录A。

浮动式核电站汽轮发电机组的选型和设计期待可以在未来继续深化和提升,一方面是热力系统继续优化,同时研究混合式给水加热器的可行性;另一方面深化汽轮机和仪表取样设备的结构设计,减少浮动平台上环境对设备的不利影响,提高设备对预定恶劣环境的抵抗能力。

参考文献:

- [1] 邹树梁,葛馨,黄燕.海上浮动核电站发展现状及政策标准[J].*舰船科学技术*,2019,41(10):80-83,93. DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2019.10.015.  
ZOU S L, GE X, HUANG Y. Research on development status and policy standards of floating nuclear power plants at home and abroad [J]. *Ship science and technology*, 2019, 41(10): 80-83, 93. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.10.015.
- [2] 郑洁,余凡,朱军民,等.海洋核动力装备国内外发展现状与前景展望[J].*中国工程科学*,2023,25(3):62-73. DOI:10.15302/J-SSCAE-2023.03.007.  
ZHENG J, YU F, ZHU J M, et al. Development status and prospect of marine nuclear power equipment in China and abroad [J]. *Strategic study of CAE*, 2023, 25(3): 62-73. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.03.007.
- [3] 陈艳霞,朱成华,郭健,等.海上浮动核电站总体设计初探[J].*核动力工程*,2021,42(3):171-176. DOI:10.13832/j.jnpe.2021.03.0171.  
CHEN Y X, ZHU C H, GUO J, et al. Preliminary study of general design of floating nuclear power plants [J]. *Nuclear power engineering*, 2021, 42(3): 171-176. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0171.
- [4] ROSATOM. World's only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation [EB/OL]. (2020-05-22) [2024-05-01]. [https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/roastom-world-s-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation/?sphrase\\_id=5177999](https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/roastom-world-s-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation/?sphrase_id=5177999).
- [5] 赵松,宋岳.国内外浮动式核电站发展综述[C]//中国核科学技术进展报告(第五卷).威海:中国核学会,2017:104-109.  
ZHAO S, SONG Y. A development overview of national and international floating nuclear power plant [C]//Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol.5). Weihai: Chinese Nuclear Society, 2017: 104-109.
- [6] 董海防.海洋核动力平台发展研究综述[J].*船舶工程*,2019,41(11):N9-N14.  
DONG H F. A review on the development of marine nuclear power platforms [J]. *Ship engineering*, 2019, 41(11): N9-N14.
- [7] 李娃娃,刘峰,赵芳.国外海上浮动核电站的产业发展现状[J].*船舶工程*,2017,39(4):7-11. DOI:10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.007.  
LI J J, LIU F, ZHAO F. Development status of overseas offshore floating nuclear plant industry [J]. *Ship engineering*, 2017, 39(4): 7-11. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.007.
- [8] 伍赛特.海上浮动式核电站应用前景展望[J].*能源研究与管理*,2019(2):11-14. DOI:10.16056/j.1005-7676.2019.02.004.  
WU S T. Prospects for the application of offshore floating nuclear power plants [J]. *Energy research and management*, 2019(2): 11-14. DOI: 10.16056/j.1005-7676.2019.02.004.
- [9] 李华成,刘聪,劳业程,等.ACPR50S小型堆核电站海上平台形式论证[J].*广东造船*,2015,34(6):33-35,32. DOI:10.3969/j.issn.2095-6622.2015.06.008.

- LI H C, LIU C, LAO Y C, et al. Floating platform type design for ACPR50S small offshore nuclear power plant [J]. *Guangdong shipbuilding*, 2015, 34(6): 33-35, 32. DOI: [10.3969/j.issn.2095-6622.2015.06.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-6622.2015.06.008).
- [10] 王东辉, 李庆, 宋丹戎, 等. 船坞式浮动核电站总体技术研究 [J]. *核动力工程*, 2023, 44(4): 1-8. DOI: [10.13832/j.jnpe.2023.04.0001](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.04.0001).
- WANG D H, LI Q, SONG D R, et al. Overall study of dock-based floating nuclear power plant [J]. *Nuclear power engineering*, 2023, 44(4): 1-8. DOI: [10.13832/j.jnpe.2023.04.0001](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.04.0001).
- [11] 于红. 核动力船舶应急准备与响应关键技术研究 [J]. *核动力工程*, 2015, 36(6): 105-108. DOI: [10.13832/j.jnpe.2015.06.0105](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2015.06.0105).
- YU H. Key technology about emergency preparedness and response for nuclear power ships [J]. *Nuclear power engineering*, 2015, 36(6): 105-108. DOI: [10.13832/j.jnpe.2015.06.0105](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2015.06.0105).
- [12] 周佳宇, 李慧子, 高华, 等. 海上浮式核电平台温排水扩散影响因素研究 [J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(11): 106-111. DOI: [10.3404/j.issn.1672-7649.2021.06.020](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2021.06.020).
- ZHOU J Y, LI H Z, GAO H, et al. Research on the influence factors of thermal discharge diffusion for a floating nuclear power plant [J]. *Ship science and technology*, 2021, 43(11): 106-111. DOI: [10.3404/j.issn.1672-7649.2021.06.020](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2021.06.020).
- [13] 田力荣, 方园, 杨继飞, 等. 浮动式核电站温排水热扩散模拟研究 [J]. *汽轮机技术*, 2019, 61(4): 271-274. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2019.04.009).
- TIAN L R, FANG Y, YANG J F, et al. The numerical simulation on hot drainage thermal diffusion of the floating nuclear power plants [J]. *Turbine technology*, 2019, 61(4): 271-274. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2019.04.009).
- [14] 戴天奇, 姚世卫, 魏志国. 海上浮动核电站温排水浮升扩散规律数值模拟 [J]. *热力发电*, 2015, 44(10): 58-62, 67. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2015.10.058](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2015.10.058).
- DAI T Q, YAO S W, WEI Z G. Numerical simulation of buoyant and diffusion rules of thermal discharge from floating nuclear power plants [J]. *Thermal power generation*, 2015, 44(10): 58-62, 67. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2015.10.058](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2015.10.058).
- [15] 张延昌, 景宝金, 童波, 等. 浮动核电站载体平台安全性设计初探 [J]. *船舶*, 2017, 28(3): 1-9. DOI: [10.19423/j.cnki.31-1561/u.2017.03.001](https://doi.org/10.19423/j.cnki.31-1561/u.2017.03.001).
- ZHANG Y C, JING B J, TONG B, et al. Safety design of carrier platform for floating nuclear power plant [J]. *Ship & boat*, 2017, 28(3): 1-9. DOI: [10.19423/j.cnki.31-1561/u.2017.03.001](https://doi.org/10.19423/j.cnki.31-1561/u.2017.03.001).
- [16] 刘峰, 李佳佳, 刘丽红, 等. 国外海上浮动核电站政策和标准规范 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(4): 12-15. DOI: [10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.012](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.012).
- LIU F, LI J J, LIU L H, et al. Policies and standards for overseas offshore floating nuclear plant [J]. *Ship engineering*, 2017, 39(4): 12-15. DOI: [10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.012](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbge.2017.04.012).
- [17] 高慧云, 霍沛强. 超超临界 350 MW 机组的可行性研究和参数选型分析 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 47-53. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.007).
- GAO H Y, HUO P Q. Feasibility reascher on ultra-supercritical 350 MW unit and analysis of main equipment parameter [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 47-53. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.007).
- [18] BUONGIORNO J, JUREWICZ J, GOLAY M, et al. The offshore floating nuclear plant concept [J]. *Nuclear technology*, 2016, 194(1): 1-14. DOI: [10.13182/NT15-49](https://doi.org/10.13182/NT15-49).
- [19] JUREWICZ J M. Design and construction of an offshore floating nuclear power plant [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- [20] 董海防, 尤小健, 许怀锦. 海洋核动力平台—下册—核动力系统与核安全文化 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
- DONG H F, YOU X J, XU H J. Marine nuclear power platform—nuclear power system and nuclear safety culture [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018.

#### 作者简介:



罗贤勇

罗贤勇(第一作者, 通信作者)

1982-, 男, 江西南昌人, 高级工程师, 华北电力大学热能工程硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作(e-mail) [luoxianyong@gedi.com.cn](mailto:luoxianyong@gedi.com.cn)

施海云

施海云, 1979-, 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电厂热机设计及管理(e-mail) [shihaiyun@gedi.com.cn](mailto:shihaiyun@gedi.com.cn)

吴家凯

吴家凯, 1976-, 男, 正高级工程师, 学士, 主要从事电力热机设计工作(e-mail) [wujiakai@gedi.com.cn](mailto:wujiakai@gedi.com.cn)

(编辑 徐嘉铖)

## 附录 A

表 A1 汽轮发电机组主要技术参数 (汽轮机)

Tab. A1 Main technical parameters of steam turbine generator set (steam turbine)

物理量	单位	参数
汽轮发电机组额定功率	MW	125
额定转速	r/min	3 000
主汽额定压力	MPa(a)	4.5
主汽额定温度	℃	294
主汽额定流量	t/h	596.8
高压缸排汽压力	MPa(a)	0.447
高压缸排汽温度	℃	147.66
高压缸排汽湿度	%	9
高压缸排汽流量	t/h	559.4
再热级数		1级
再热蒸汽压力	MPa(a)	0.432
再热蒸汽温度	℃	181.6
再热蒸汽流量	t/h	485.7
低压缸排汽压力	kPa.a	6
低压缸排汽温度	℃	36.16
低压缸排汽湿度	%	12
低压缸排汽流量	t/h	432.4
核岛给水温度	℃	140
轴系及排汽方向		单轴下排汽
配汽方式		节流配汽
回热级数		3级, 2低1除氧

表 A2 汽轮发电机组主要技术参数 (凝汽器)

Tab. A2 Main technical parameters of steam turbine generator set (condenser)

物理量	单位	参数
额定工况凝汽器压力	kPa(a)	6
循环水流程		单流程
换热管材料		钛管
冷却水进口温度	℃	16.05
冷却水流量	m <sup>3</sup> /s	8
管束内循环水平均流速	m/s	2.2
冷却水密度	kg/m <sup>3</sup>	1 025
循环水温升	℃	7.83
凝汽器面积	m <sup>2</sup>	7 000
冷却管管径	mm	25
冷却管长度	mm	11 050
冷却管数量	根	8 064
清洁度系数		0.85

表 A3 汽轮发电机组主要技术参数 (发电机)

Tab. A3 Main technical parameters of steam turbine generator set (generator)

物理量	单位	参数
额定功率	MW	125
额定电压	kV	13.8
功率因素		0.85(滞后)
额定转速	rpm	3 000
频率	Hz	50
励磁方式		静态励磁
冷却方式		空冷
效率		≥98.6%