

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.011

潮流能水轮机阵列水动力与布局优化研究进展

张继生^{1,2}, 俞诗琪², 张 灿³, 李浩然², 王芳宇²

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 概述了潮流能水轮机阵列的水动力特性, 总结了不同横向、纵向间距下水轮机尾流变化的一般规律, 梳理了水轮机阵列布局的优化方法, 从人工传统优化阵列布局与计算机自动优化阵列布局两方面回顾了水轮机阵列单目标优化与多目标优化的研究进展。人工传统布局结构简单且易于操作, 有比较强的工程实践性, 但物理试验可限制的约束条件有限, 难以模拟阵列在真实海况下的发电情况; 自动优化布局相比于人工传统布局更具有现实意义, 但依然面临经济模块因素缺乏、多目标内容待完善、理论与实践未统一、前期准备时间较长等诸多挑战。

关键词: 潮流能水轮机; 尾流规律; 阵列优化; 单目标优化; 多目标优化

中图分类号: P743.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0079-09

Research progress on hydrodynamics and layout optimization of tidal stream turbine array

ZHANG Jisheng^{1,2}, YU Shiqi², ZHANG Can³, LI Haoran², WANG Fangyu²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China)

Abstract: The article explores the hydrodynamic characteristics of turbine arrays, summarized the general rules of changes in the wake of turbines with different horizontal and longitudinal spacing, combs the optimization methods of turbine array layout, and reviews the research progress of single-objective optimization and multi-objective optimization of turbine array layout from two aspects of artificial traditional optimization of array layout and computer automatic optimization of array layout. The artificial traditional layout structure is simple and easy to operate, and more practical in engineering, while the constraints of physical tests are limited, and it is difficult to simulate the power generation of turbine array in real sea conditions; compared with the traditional layout, the automatic optimization has more practical significance, but it still faces many challenges, such as the lack of economic module factors and the multi-objective, inconsistent theory and practice, and long preparation time.

Key words: tidal stream turbine; wake flow pattern; layout optimization; single-objective optimization; multi-objective optimization

近年来我国持续优化能源结构, 2020 年提出的“双碳”目标已被世界各国广泛认可。面对环境污染严重、资源储备紧张等难题, 大力发展清洁可再生能源, 推进绿色低碳转型是实现可持续发展的必然趋势^[1-4]。根据新发布的《“十四五”现代能源体系规划》, 到 2025 年我国清洁可再生能源的发电量占比将达到 39%。

地球表面积为 5.1 亿 km², 其中海洋面积约占总表面积的 71%, 据联合国教科文组织权威统计, 全世界清洁可再生海洋能理论储量超过 7.66 亿 MW, 其中潮流能理论可开发量超 60 亿 kW^[5]。潮流能可预测性强, 能流密度高, 是学者们高度关注的绿色能源之一。潮流能主要通过潮流能水轮机(以下简称水轮机)将其动能转换为电能。根据旋转轴与来流方向的相对位置关系, 水轮机主要分为水平轴水轮机^[6-7]和垂直轴水轮机^[8-9], 其他还有振荡水翼式^[10]、导流罩式水轮机^[11]等。

本文简述了国内外潮流能发电场建造运行情况, 总结了潮流能水轮机阵列水动力特性, 对阵列中横纵间

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4204102)

作者简介: 张继生(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋可再生能源工程研究。E-mail: jszhang@hhu.edu.cn

引用本文: 张继生, 俞诗琪, 张灿, 等. 潮流能水轮机阵列水动力与布局优化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 79-87.

ZHANG Jisheng, YU Shiqi, ZHANG Can, et al. Research progress on hydrodynamics and layout optimization of tidal stream turbine array [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 79-87.

距与尾流变化规律、人工传统布局优化、计算机自动优化的单、多目标优化等方面的研究进行综述,以期能为水轮机阵列的工程实践提供参考。

1 潮流能发电工程现状

相比于风力发电的规模化发展,国际上的潮流能发电技术起步较晚,也不够成熟^[12]。英国的潮流能技术在国际上处于领先地位,英国 Atlantis Energy 公司自 2012 年开始,在苏格兰彭特兰湾建设总装机 398 MW 的潮流能发电场(MeyGen 项目),是目前世界范围内最大的潮流能规模化开发工程项目^[13-14];2023 年 2 月,英国 SIMEC 公司宣布,MeyGen 项目成为全球首个累计发电量突破 5 000 万 kW·h 的潮流能发电项目。2015 年,荷兰 Tocado 公司和 Huisman 公司在风暴桥的桥桩上布置安装了 5 台 T2 水轮机,总装机容量达到 1.25 MW,其产生的电力已用于当地 1 000 户居民的日常生活,有力地推动了国际潮流能发电技术的商业化发展^[15];苏格兰 Nova Innovation 公司与比利时 ELSA 公司在英国 Buie Mull 海峡获准建设 3 台 Nova M-100 水轮机组成的潮流能发电阵列^[16],在 2016 年 3 月至 2017 年 2 月,3 台水轮机成功布放至目标海域,目前已实现并网运行。

我国潮流能开发技术的研究始于 20 世纪 80 年代,近年来在国家的支持下发展迅速^[17-18]。例如,2016 年,浙江舟山联合动能新能源开发有限公司开发了总功率为 1 MW 的 LHD 潮流能发电项目;2018 年 12 月,LHD 第三代水平轴式模块化发电机组投入运行;2022 年 2 月,LHD 潮流能发电工程总装机容量达到 3.3 MW。2020 年 6 月,舟山潮流能示范工程的潮流能水轮机正式实现了双向并网互通,成为国内首个具备公共测试和示范功能的公益性开放型国家级潮流能试验场^[19]。

目前在实际海域的水轮机并网发电虽然容量能够达到千瓦以及兆瓦等级,但是发电场数量较少,且每个发电场中一般为单个水轮机或数量不超过 5 个机组的小型阵列,不足以实现潮流能商业化的目标,因此潮流能水轮机的阵列化布置是实现潮流能发电工程规模化、产业化发展的必然趋势,如何合理布局水轮机阵列使其高效获益已成为当下研究的热点^[20-21]。

2 水轮机优化布局水动力特性

水轮机阵列形式的合理布局与其水动力特性密切相关。尾流是影响水轮机阵列排布最重要的因素之一^[22],水流经过水轮机后会产生尾流,尾流的存在使水轮机下游流体流速分布发生改变,从而影响下游水轮机的获能情况。垂直轴水轮机尾流场影响长度略短于水平轴水轮机^[23-24],尾流恢复速度更快,但阵列中水轮机间距对尾流的影响两者相似。学者们通过大量数值模拟与物理模型试验研究了单台水轮机以及不同横向、纵向间距情况下多台水轮机阵列的尾流场变化规律,为水轮机阵列排布形式的探究打下了坚实的基础。

2.1 横向间距对尾流的影响

对于单台水轮机,朱善强等^[25]通过计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)方法得到尾流在单台水轮机位置横向方向上的速度亏损范围约为 1D(D 为水轮机直径),并建议布置多台水轮机时,横向间距至少为 2D。

对于双台水轮机,谢永和等^[26]通过物理试验发现,当两台水轮机的间距足够近时,会提升两台水轮机的获能效率,但维护难度增加。Myers 等^[27]研究了并列排布的双台水轮机在不同横向间距时的下游尾流,发现较小的横向间距会使尾流合并形成具有更大速度损失的尾流并向下游传播,但适当扩大横向间距后能够在尾流间隙中观察到加速流体,即形成尾流流速加速区。Myers 等^[28]对该加速区流体做了进一步研究,指出合理安排横向间距能够使得下游水轮机从上游水轮机组形成的尾流加速区中获益。张继生等^[29]通过数值模拟分析得出,扩大该横向间距会减小尾流中的加速区。

对于多台水轮机,李东阔等^[30]研究了横向布置的单排水轮机横向间距为 2D、2.5D 和 3D 时横、纵向尾流变化,发现不同间距的横向尾流没有明显的不同,但横向间距的增大会加快纵向尾流流速的恢复。李林杰^[31]模拟了不同横向间距下水轮机组尾流场特性,发现单排水轮机在横向间距大于或等于 2.5D 时,后方会形成相互独立的尾流场,小于 2D 时则混合成一个尾流场,且混合后的尾流流速恢复速度降低。Stallard 等^[32]的单排水轮机阵列试验表明,当横向间距小于 2D 时,同排水轮机的尾流在后方 2D 处开始混合并在 4D 处完全混合。因此,合理安排水轮机之间的横向距离,有助于控制纵向尾流恢复距离。

2.2 纵向间距对尾流的影响

李岩伟等^[33-34]通过 CFD 方法分析了纵向单列布置的两台水轮机水动力性能及下游水轮机在不同位置时的获能效率,发现在尾流区内下游水轮机的发电效率随纵向间距的增加而增加,主要是由于下游流速会随着距离的增加而逐渐恢复。

对于单台水轮机远场流速,安佰娜等^[35-36]通过评估单台水轮机的尾流特性,发现下游 $2D \sim 8D$ 的尾流恢复十分迅速,能够在 $10D$ 处恢复至来流流速的 86.3% ,但 $10D$ 后尾流恢复速度变慢,尾流流速在 $40D$ 处才几乎完全恢复。辛小鹏等^[37]建议同列布置的双台水轮机,下游水轮机应与上游水轮机间隔 $30D$ 以上。

随着水轮机数量的增加,阵列中水轮机纵向尾流之间的相互影响不可避免。Malki 等^[38]采用 CFD 方法模拟水轮机阵列周围流场,发现阵列后方通常会出现大片低速尾流场,在后方 $40D$ 左右流速才会完全恢复,这与单台水轮机的尾流恢复情况相似。于书帆等^[34]模拟了两台交错布置的水轮机并观察其尾流形态,相比于单台水轮机的尾流,双台水轮机的尾流泄涡脱落更慢,尾流恢复所需距离更长。李岩伟等^[33]通过模拟单列布置的双台水轮机,发现纵向间距主要影响下游水轮机后方 $5D$ 内尾流流速亏损,而对远端流场影响较小。因此,对于纵向排布的双台水轮流场,完全恢复到初始状态所需距离与水轮机之间纵向间距无关。Chang-Jo 等^[39]对交错排布的水轮机阵列进行数值模拟,发现在第一排水轮机后方 $15D$ 范围内流速损失严重,不适合安装第二排水轮机;上下游间距宜为 $20D \sim 30D$,此时流速恢复至来流流速的 80% 以上。

已有学者通过物理试验与数值模拟探寻水流经过单台水轮机与水轮机阵列时产生的尾流场规律,总结了水轮机组的尾流场流速变化规律,提出合适的纵横间距:一般取横向间距为 $2D$,纵向间距为 $15D$ 以上。在合适的横纵间距下,水轮机阵列中下游水轮机虽然会处于上游的尾流环境中,但能够保持较优的发电效率,另外流场的紊动特性、波流耦合^[40]与安装高度^[41]等研究丰富了水轮机尾流规律内容,为探究水轮机阵列排布方案提供了理论基础。

3 水轮机阵列传统布局形式

结合水轮机尾流规律,学者们对水轮机阵列的排布方案与间距影响有了更进一步的理解。Li 等^[42-44]开发了一种用于分析双台水轮机系统参数与输出功率之间关系的数值模型,谢永和等^[26]在拖曳水池中进行了双台水轮机物理模型试验,研究了不同相对位置时两台水轮机之间流体相互作用的影响,结果表明双台水轮机在并排布置时发电效率最高。对于双台水轮机,Antheaume 等^[45-46]的研究指出单排水轮机的平均发电效率会随水轮机数量和直径的增加而提升,该结论在 Vennell 等^[47-48]的研究中得到扩充,即高占比通道截面会得到较高的发电场总效率,但单台水轮机发电效率会降低,且对下游流速的影响非常大。对于单排布置的水轮机阵列,所有水轮机不会受到上游干扰,能够获取原始の入流能量。若仅考虑获能最大化,增加水流通道内水轮机阻塞比便可实现,但紧密的排布方式不仅限制了水轮机数量,对环境的影响也不可忽视。当阵列规模进一步扩大时,阵列布局将呈现出多行布置特性。

通过对水轮机尾流等现象的规律总结,结合风力发电机阵列的布局方法和经验,学者们总结了常用的几种传统水轮机阵列排布方案(图 1,以 3×3 阵列为例)。根据阵列内水轮机相对位置的不同可以分为:①规则布局(图 1(a))。通常为固定纵向与横向间距的行列对齐的排布方式。②交错布局(图 1(b))。下游每台水轮机都处于上游对应两台水轮机中间的排布方案。根据水轮机阵列整体与水道中心线的相对位置可以分为水道中心布放(图 1(c))和水道偏心布放(图 1(d)),水轮机阵列整体放置于水道的中间位置、偏心位置,通常与前两种排布方案结合。

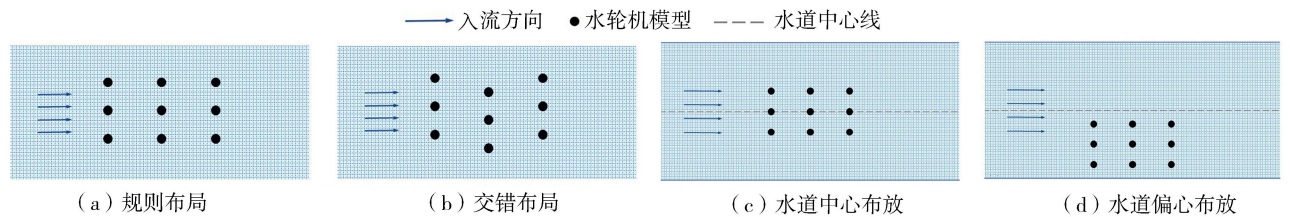


图 1 常见水轮机阵列排布方案

Fig. 1 Common arrangement scheme of turbine array

对于图 1 所示排布方案,学者们做了大量模拟试验,用于得出具有更高发电效率的阵列形式。Lee 等^[49]采用静止转子模拟交错排布的 4 排水轮机阵列,发现纵向间距小于 3D 时下游水轮机会受到上游水轮机尾流影响,发电效率较低。O'doherty 等^[50]研究了两排水轮机情况,发现当后排水轮机与前排距离大于 5D 且交错布置时获能最高,可达前排获能的 88%。Divett 等^[51]采用了自适应网格流求解器模拟了 4 种不同阵列(通道中心规则排布、通道偏心规则排布、上下游间距加倍通道中心规则排布和交错排布)的水轮机,发现偏心排布与中心排布的阵列获能效率差异很小;间距加倍的规则排布发电效率比初始规则排布的高 31%;交错排布的阵列能够得到最高的发电效率,比规则排布高 54%。高鹏^[52]对舟山葫芦岛附近海域进行模拟,设置了规则与交错两组 3×2 的水轮机阵列,发现交错排布能够获取更多的总能量。Chen 等^[53]采用三维数值模拟和动量损失方法,分析交错排布的水轮机阵列对斋堂岛附近海域的潮流能获取情况,发现当纵向距离在 5D 时阵列中水轮机功率分布很不均匀,下游水轮机性能被低估,当纵向间距扩大为 10D 时下游水轮机性能明显改善。基于以上结果,袁鹏等^[54]探究了横纵间距变化对产能的影响规律,当纵向间距小于 10D 时增加纵向间距对发电效率有显著提升,但大于 15D 后纵向距离的增加几乎不产生影响。目前交错布局已成为当前最优的简单排布方案,但依然停留在模拟研究阶段。

对水轮机阵列传统排布的方式探究主要集中于改变横向、纵向间距与简单改变阵列方式,该种方式在本质上是根据经验枚举了水轮机组的布局方式,计算样本少;此外,此种人为优化布局的方法仅停留在对发电效率最大化的单目标优化。然而,面对全球潮流能资源时空分布不均以及海洋空间资源规划复杂的现状,仅考虑发电效率最大化并不现实,应加入更多约束条件使优化目标更具说服力,因此随着优化算法的不断发展,利用计算机优化阵列布局的方法逐渐进入人们的视野。

4 水轮机阵列自动优化布局

相对于传统的人为优化阵列布局形式,计算机自动优化阵列布局不仅能实现对发电效率最大化的单目标优化,还可以实现考虑发电效率、经济成本、环境保护等条件的多目标优化。

目前对水轮机阵列布局的自动优化主要是依托于高性能计算机集群。自动优化方法多用于风力发电机阵列布局优化,后针对水轮机特性进行改进,通常采用水轮机概化模型(多为底摩阻概化,即采用增强海床底部摩擦阻力的方式模拟水轮机)或解析尾流模型(将水轮机对流场的影响转化为单纯的尾流形式,常用 Jensen 尾流模型)模拟水轮机个体或阵列整体。在自动优化过程,优化算法将设置约束项与目标项,并以水轮机位置为被优化参数,不断进行调整以寻找最优阵列布局。自动优化算法能够在数千种方案中进行对比择优,近年来学者们使用不同算法对阵列进行优化使整体发电量进一步提升。

4.1 水轮机阵列单目标优化

水轮机阵列的单目标优化是指仅设置一个目标项对水轮机的优化方向进行约束,这个目标项通常为阵列的整体发电量,即优化后的阵列布局可获得最大发电量。计算机自动优化的历程始于单目标优化,在风力资源与潮流资源的开发中都进行过分析,建立基于不同环境与不同优化算法的阵列迭代优化模型,运行结果显示优化后的阵列形式能够提升发电场的发电效率。

自动优化算法最初应用于风电场,Bilbao 等^[55]将风电场划分为 10×10 的网格单元,每个单元设置“存在风机”和“不存在风机”两种情况,利用模拟退火法(simulated annealing, SA)与分布式遗传算法(distributed genetic algorithm, DGA)在 3 种不同风况下对风电场同时进行优化,结果显示 SA 方法比 DGA 方法所得阵列获能更多。万春秋等^[56]采用基于惩罚函数的粒子群优化算法对风力发电机的发电效率进行优化,在不同的风力条件下粒子群遗传算法收敛快、计算量小,且优化布局后的发电效率得到显著提升。

风力发电场和潮流发电场相似但也具有一定差异:风往往是随机的,潮流具有可预测性;风力发电机直径与大气高度的比值很小,但水轮机直径与水深的比值较大,有助于尾流恢复但尾流长度会增加。吴国伟等^[57]提出离散粒子群(discrete particle swarm optimization, DPSO)优化算法并结合舟山葫芦岛-普陀山岛的水道涨落潮数据对水轮机阵列进行优化布局,经 DPSO 算法优化后水轮机发电量比传统交错布局的发电量在涨急和落急时刻分别提高了 7.56% 和 9.04%,并得出水轮机间最小间距对结果影响较大的结论。刘丞等^[58]开发了一种改进的自适应罚函数粒子群算法,该算法能在找寻最优解的过程中对目标函数作合理变换使其快速收敛,优化后的阵列布局发电量可提高 4.37%。吴亚楠等^[59]将计算海域离散为矩阵,提出一种改

进的离散量子粒子群算法(quantum discrete particle swarm, QDPS),该算法收敛速度快,优化后的总发电量增量明显,但该算法使用了风力发电机尾流模型,且算法具有随机性,重复试验的结果略有差异。王丛佼等^[60]改进了常用于电力系统的差分进化算法(differential evolution, DE),使算法收敛速度更快。

Funke 等^[61]开发了基于梯度遗传算法的 OpenTidalFarm 开源代码,其采用增强海床底部摩擦阻力的方式模拟水轮机,使用基于梯度的优化算法求解水轮机阵列的最优布局形式,该方法的计算迭代能够独立于水轮机数量之外,适用于大数量水轮机阵列。Funke 等^[62]应用 OpenTidalFarm 优化了英国彭特兰湾潮流能场中 128 台和 256 台水轮机的布局,单台水轮机的平均发电量达到 1.05 MW。张继生等^[63]应用 OpenTidalFarm 建立舟山海域潮流能数学模型,优化了初始规则排布的 9 台水轮机,优化后的单台水轮机功率平均值比初始值提高了 15.2%。王雅^[64]对舟山葫芦岛海域水轮机进行了拓展研究,优化了 7 组不同数量的水轮机阵列,发电功率最高能比初始阵列增加 44% 以上。Zhang 等^[65]研究了由 18 台水轮机组成的水轮机阵列,将其布置为规则、交错、计算机优化 3 种布局,对比了能量提取效率并分析其尾流特性,可为舟山群岛水轮机的部署提供建议。

4.2 水轮机阵列多目标优化

水轮机阵列的多目标优化是通过在自动优化算法中设置多个约束项实现的,目前研究主要考虑的是水轮机阵列发电效率、经济成本与周围环境动力响应,使优化后的阵列布局更具经济性与现实意义。

González-Gorbeña 等^[66-67]拟合了纵向、横向、垂直间距,以及流向、长度等变量的目标函数,并评估了经济和环境因素,建立了水轮机阵列的约束优化数学模型,较早尝试了多目标优化。Goss 等^[68]建立以开源海洋模型框架 Thetis 为基础的水轮机阵列自动优化模型,将水轮机数量作为成本限制条件,实现了水轮机发电效率与数量设定的多目标优化技术。

潮流经过阵列后会损失能量,主要表现在其布置区域水位与流速的降低。Chen 等^[69]通过在我国台湾海峡布置水轮机阵列时发现,水轮机阵列后方会形成明显的减速区域,当水轮机数量达 55 台时流速最大下降值为 0.05 m/s。袁鹏等^[70]采用 Delft3D-flow 和 WAVE 模块耦合的形式,建立斋堂岛海域三维波流双向耦合模型,发现水流经过水轮机阵列后,潮位和流速的变化主要发生在沿岸海域,特别是流过水轮机和窄形水道后形成的交汇区域。Phoenix 等^[71]以降低流速损失为约束,使用多尺度嵌套模型,利用贪婪算法找到水轮机阵列最优布局。水轮机阵列布置会影响原有的潮汐过程,进而干扰沉积物的沉降,最终对一些生物的活动行为及其栖息地产生影响。Du Feu 等^[72]在 2017 年将减少对特定海域流速的影响作为约束条件并入优化模型,分析了阵列布局在不大幅降低发电功率的情况下减少了对流速的影响;在 2019 年考虑了潮汐模式改变对特定物种或其栖息地的影响,并将“减少此影响”作为约束条件加入自动优化算法^[73],由此优化得到的阵列减少了对物种栖息地适宜性的负面影响,甚至能够产生正面影响。

在潮流能丰富的区域通常会考虑布置多个水轮机阵列来提取能量,此时不仅要面临环境影响范围的扩大,阵列之间的互相影响也不可忽略。Goss 等^[74]将 Thetis 应用于奥尔德尼岛水道,分析了两个直接相邻的水轮机阵列之间的竞争效应。Zhang 等^[75]利用 Thetis 分析了舟山葫芦岛与桃花岛附近的 4 个水轮机阵列的竞争效应,发现两个岛之间的阵列没有明显的竞争效应,但葫芦岛周围的 3 个水轮机阵列之间存在显著的竞争效应,优化布局时需要考虑优化的顺序。

对比分析水轮机阵列布局自动优化不同策略方法可以发现,通过设置不同约束条件得到最优目标解,使计算机优化结果更具现实意义与经济价值,且计算机自动优化所得的水轮机阵列布局均优于传统布局。因此,计算机自动优化水轮机阵列布局对于潮流能资源的大规模开发利用具有重要意义。

4.3 自动优化布局的不足

计算机的多目标优化阵列相比于其单目标优化阵列更具有现实意义,但其阵列布局优化过程中依然面临着诸多挑战:①经济模块因素缺乏。当前研究所考虑的经济成本不够全面,应将实际工程中的施工成本、电缆铺设等方面纳入考量。②多目标内容待完善。除了经济成本与流速损失控制以外,可拓展泥沙和生态等模块,使优化结果更具工程实际意义。③理论与实践未统一。水轮机阵列优化结果尚未得到工程验证,如何将大型阵列布局的优化结果进行验证使其具备说服力,以及如何将其应用于实际海域是未来工作的重点。④前期准备时间较长。布放大规模水轮机阵列需要提前对海域进行精细化勘测,但布置范围一般远离陆地,实测数据较少,因此前期准备时间较长。

5 结 语

为了实现可持续发展,绿色清洁可再生能源正在逐步取代传统化石能源,其中研究热点潮流能近年来已
在世界范围内得到广泛关注。本文探究了水轮机阵列水动力特性,总结了不同横向、纵向间距下水轮机尾流
变化的一般规律以及水轮机传统布局中合适的横纵间距,以此为基础,本文提出了以最大化潮流能水轮机发
电效率为单目标的传统水轮机阵列布局形式;随着优化算法的不断发展,实现了该单目标的计算机自动优
化,此外也实现了考虑发电效率、经济成本、环境影响等条件的计算机多目标优化,使优化结果更具实际工程
意义。

人工传统布局结构简单易于操作,有比较强的工程实践性,但物理试验可限制的约束条件有限,并且难
以模拟阵列在真实海况下的发电情况,目前已有小范围海域的小型水轮机阵列海试,试验结果可成为进一步
扩大阵列的基础。自动优化布局相比于人工传统布局更具现实意义,但依然面临经济模块因素缺乏、多目标
内容待完善、理论与实践未统一、前期准备时间较长等诸多挑战。

水轮机的阵列发电工程建设范围内正在如火如荼地开展,大型阵列虽然能够为世界的能源结构调整与
绿色发展提供支持,但近海资源十分珍贵,需要使用大范围海域的潮流能阵列,未来很有可能需要依靠深远
海技术以及漂浮式系泊基础。深水工程的发展能够进一步推动潮流能资源的开发,也可为其他海洋能资源
利用发展提供新方向。

参考文献:

[1] 郑金海,张继生. 海洋能利用工程的研究进展与关键科技问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):450-455.
(ZHENG Jinhai,ZHANG Jisheng. Recent advances and key technologies in marine energy utilization engineering[J]. Journal of
Hohai University(Natural Sciences),2015,43(5):450-455. (in Chinese))

[2] 张兵,郭梦安妮,黄永春. 创新环境能否降低碳排放强度? [J]. 水利经济,2023,41(5):1-8. (ZHANG Bing, GUO
Meng' anni,HUANG Yongchun. Can innovation environment help reduce carbon intensity[J]. Journal of Economics of Water
Resources,2023,41(5):1-8. (in Chinese))

[3] 张继生,唐子豪,钱方舒. 海洋温差能发展现状与关键科技问题研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):
55-64. (ZHANG Jisheng,TANG Zihao,QIAN Fangshu. A review of recent advances and key technologies in ocean thermal energy
conversion[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):55-64. (in Chinese))

[4] 沈心怡,马骏,卢玉钦. 碳中和目标下我国绿色水电碳减排效率评价[J]. 水利经济,2022,40(4):23-27. (SHEN Xinyi,MA
Jun,LU Yuqin. Evaluation of carbon emission reduction efficiency of China's green hydropower under the goal of carbon
neutralization[J]. Journal of Economics of Water Resources,2022,40(4):23-27. (in Chinese))

[5] 李守宏,李锋,王冀,等. 我国海洋能开发用海现状及发展建议[J]. 海洋开发与管理,2014,31(9):7-11. (LI Shouhong,LI
Feng,WANG Ji,et al. Current situation and development suggestions of Marine energy development in China[J]. Ocean
Development and Management,2014,31(9):7-11. (in Chinese))

[6] 陈汨梨,林祥峰,张明宗,等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50
(2):17-22. (CHEN Mili,LIN Xiangfeng,ZHANG Mingzong,et al. Experimental study on scour process around mono-pile
foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(2):
17-22. (in Chinese))

[7] AMIRI H A,SHAFAGHAT R,ALAMIAN R,et al. Study of horizontal axis tidal turbine performance and investigation on the
optimum fixed pitch angle using CFD:a case study of Iran[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid
Flow,2019,30(1):206-227.

[8] DERAKHSHAN S,ASHOORI M,SALEMI A. Experimental and numerical study of a vertical axis tidal turbine performance[J].
Ocean Engineering,2017,137:59-67.

[9] 张理,李志川. 潮流能开发现状、发展趋势及面临的力学问题[J]. 力学学报,2016,48(5):1019-1032. (ZHANG Li,LI
Zhichuan. Development status,trend and the problems of mechanics of tidal current energy[J]. Chinese Journal of Theoretical and
Applied Mechanics,2016,48(5):1019-1032. (in Chinese))

[10] 马馨,程永光,高利军. 导流罩对潮流能水轮机效率提升分析[J]. 水电能源科学,2020,38(4):146-149. (MA Xin,CHENG
Yongguang,GAO Lijun. Improving efficiency of tidal current turbine by adding funnel-shaped flow concentrating passage[J].
Water Resources and Power,2020,38(4):146-149. (in Chinese))

[11] NACHTANE M,TARFAOUI M,GODA I,et al. A review on the technologies,design considerations and numerical models of tidal

- current turbines[J]. *Renewable Energy*,2020,157:1274-1288.
- [12] 万春秋,王峻,杨耕,等. 基于静态评价粒子群的风电场微观选址方法[J]. *太阳能学报*,2012,33(12):2185-2192. (WAN Chunqiu,WANG Jun,YANG Geng,et al. Wind farm micro-siting based on particle swarm optimization with static evaluation[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*,2012,33(12):2185-2192. (in Chinese))
- [13] SANGIULIANO S J. Turning of the tides:assessing the international implementation of tidal current turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2017,80(9):67-83.
- [14] ANONYMOUS. MeyGen Tidal Energy Project[M]. London: Utility Week, 2017: 203-217.
- [15] 麻常雷,夏登文,王萌,等. 国际海洋能技术进展综述[J]. *海洋技术学报*,2017,36(4):70-75. (MA Changlei,XIA Dengwen,WANG Meng,et al. Review on the progress of marine renewable energy technologies in the world[J]. *Journal of Ocean Technology*,2017,36(4):70-75. (in Chinese))
- [16] 刘玉新,麻常雷. 英国海洋能开发利用分析[J]. *海洋开发与管理*,2018,35(3):3-7. (LIU Yuxin,MA Changlei. The utilization of marine renewable energy in UK[J]. *Ocean Development and Management*,2018,35(3):3-7. (in Chinese))
- [17] 王世明,李森森,李泽宇,等. 国际潮流能利用技术发展综述[J]. *船舶工程*,2020,42(增刊1):23-28. (WANG Shiming,LI Miaomiao,LI Zeyu,et al. Development overview of international tidal energy utilization technology[J]. *Ship Engineering*,2020,42(Sup1):23-28. (in Chinese))
- [18] 张亮,李新仲,耿敬,等. 潮流能研究现状 2013[J]. *新能源进展*,2013,1(1):53-68. (ZHANG Liang,LI Xinzhong,GENG Jing,et al. Tidal current energy update 2013[J]. *Advances in New and Renewable Energy*,2013,1(1):53-68. (in Chinese))
- [19] 张继生,汪国辉,林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2021,49(3):220-232. (ZHANG Jisheng,WANG Guohui,LIN Xiangfeng. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2021,49(3):220-232. (in Chinese))
- [20] LO BRUTTO O A,GUILLOU S S,THIÉBOT J,et al. Assessing the effectiveness of a global optimum strategy within a tidal farm for power maximization[J]. *Applied Energy*,2017,204:653-666.
- [21] BLUNDEN L S,BAHAJ A S. Tidal energy resource assessment for tidal stream generators[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers:Part A Journal of Power Energy*,2007,221(A2):137-146.
- [22] 苏琳惠. 竖直轴潮流能水轮机阵列排布优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [23] BACHANT P,WOSNIK M. Characterising the near-wake of a cross-flow turbine[J]. *Journal of Turbulence*,2015,16(4):392-410.
- [24] PEACE S. Another approach to wind:vertical-axis turbines may avoid the limitations of today's standard propeller-like machines[J]. *Mechanical Engineering*,2004,126(6):28-31.
- [25] 朱善强,李广年,李振琦,等. 水平轴潮流能水轮机尾流特性研究[J]. *可再生能源*,2022,40(2):278-284. (ZHU Shanqiang,LI Guangnian,LI Zhenqi,et al. Study on the wake characteristics of horizontal axis tidal current turbine[J]. *Renewable Energy Resources*,2022,40(2):278-284. (in Chinese))
- [26] 谢永和,李广年,张兆德. 竖轴潮流能水轮机组排列规律试验研究[J]. *太阳能学报*,2017,38(2):537-542. (XIE Yonghe,LI Guangnian,ZHANG Zhao. Experimental analysis of arrangement rule for vertical axis tidal current turbine[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*,2017,38(2):537-542. (in Chinese))
- [27] MYERS L E,KEOGH B,BAHAJ A S. Experimental investigation of inter-array wake properties in early tidal turbine arrays[C]// MTS/IEEE Oceans Conference. New York:IEEE,2011:1-8.
- [28] MYERS L E,BAHAJ A S. An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays[J]. *Renewable Energy*,2012,37(1):28-36.
- [29] 张继生,曹运修,吴修广,等. 并排水平轴潮流能水轮机组水动力特性研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2017,45(3):256-262. (ZHANG Jisheng,CAO Yunxiu,WU Xiuguang,et al. Investigation of hydrodynamic characteristics around parallel-arranged horizontal-axis tidal stream turbines[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2017,45(3):256-262. (in Chinese))
- [30] 李东阔,郑源,张飞,等. 横向布置单桩潮流能水轮机的数值模拟研究[J]. *可再生能源*,2020,38(6):784-790. (LI Dongkuo,ZHENG Yuan,ZHANG Fei,et al. Numerical simulation study of single pile tidal stream turbine with different lateral spacing[J]. *Renewable Energy Resources*,2020,38(6):784-790. (in Chinese))
- [31] 李林杰. 潮流能发电场水轮机排布对流场影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [32] STALLARD T,COLLINGS R,FENG T,et al. Interactions between tidal turbine wakes:experimental study of a group of three-bladed rotors[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A:Mathematical,Physical and Engineering Sciences*,2013,371(1985):20120159.
- [33] 李岩伟,郑源,张玉全,等. 潮流能水轮机双机组单列布置数值模拟研究[J]. *水电能源科学*,2021,39(12):188-191. (LI

- Yanwei,ZHENG Yuan,ZHANG Yuquan,et al. Numerical simulation study on single-row arrangement dual-units of tidal current turbine[J]. Water Resources and Power,2021,39(12):188-191. (in Chinese))
- [34] 于书帆,陈建,昌垚晖,等. 不同交错排布对潮流能垂直轴水轮机性能的影响[J]. 热能动力工程,2022,37(1):157-165. (YU Shufan,CHEN Jian,CHANG Yaohui,et al. Influence of different staggered arrangements on the performance of vertical axis turbine with tidal current energy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(1):157-165. (in Chinese))
- [35] 安佰娜. 潮流能发电场尾流场数值模拟及其多机组影响规律研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
- [36] JO C H,LEE J H,RHO Y H,et al. Performance analysis of a HAT tidal current turbine and wake flow characteristics[J]. Renewable Energy,2014,65:175-182.
- [37] 辛小鹏,邵雪明,邓见,等. 串列布置双转子海流机水动力性能预测[J]. 浙江大学学报(工学版),2011,45(7):1227-1231. (XIN Xiaopeng,SHAO Xueming,DENG Jian,et al. Hydrodynamic performance prediction of marine current turbine with dual rotor in tandem arrangement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2011,45(7):1227-1231. (in Chinese))
- [38] MALKI R,WILLIAMS A J,CROFT T N,et al. A coupled blade element momentumL;computational fluid dynamics model for evaluating tidal stream turbine performance[J]. Applied Mathematical Modelling,2013,37(5):3006-3020.
- [39] CHANG-JO Y,ANH D H. A study on effect of longitudinal and lateral spaces in tidal farm by CFX[C]//Asian Wave and Tidal Conference Series. Hawaii:Ocean,Offshore and Arctic Engineering Division,2012:205-214.
- [40] 张继生,张婧,王日升,等. 波流共同作用下水平轴潮流能水轮机水动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):175-182. (ZHANG Jisheng,ZHANG Jing,WANG Risheng,et al. Investigation on the hydrodynamics around a tidal stream turbine of horizontal axis under the combined action of wave and current[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):175-182. (in Chinese))
- [41] 张继生,曹运修,吴修广,等. 并排水平轴潮流能水轮机组水动力特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):256-262. (ZHANG Jisheng,CAO Yunxiu,WU Xiuguang,et al. Investigation of hydrodynamic characteristics around parallel-arranged horizontal-axis tidal stream turbines[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):256-262. (in Chinese))
- [42] LI Y,CALISAL S M. Preliminary investigation of power output of two typical two-turbine tidal current systems[C]//Asme International Conference on Ocean. New York:American Society of Mechanical Engineers,2009:1181-1187.
- [43] LI Y,CALISAL S M. Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbine(Part I):power output[J]. Ocean Engineering,2010,37(7):627-637.
- [44] LI Y,CALISAL S M. Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbine(Part II):torque fluctuation[J]. Ocean Engineering,2011,38(4):550-558.
- [45] ANTREAUME S,MAÎTRE T,ACHARD J L. Hydraulic Darrieus turbines efficiency for free fluid flow conditions versus power farms conditions[J]. Renewable Energy,2008,33(10):2186-2198.
- [46] GOUDE A,AGREN O. Numerical simulation of a farm of vertical axis marine current turbines[C]//Proceedings of The Asme 29th International Conference on Ocean,Offshore and Arctic Engineering. New York:American Society of Mechanical Engineers,2010:335-344.
- [47] VENNEL R,FUNKE S W,DRAPER S,et al. Designing large arrays of tidal turbines:a synthesis and review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,41:454-472.
- [48] VENNEL R. An optimal tuning strategy for tidal turbines[J]. Proceedings of the Royal Society A:Mathematical,Physical and Engineering Sciences,2016,472(2195):1-28.
- [49] LEE S H,SANG H L,JANG K,et al. A numerical study for the optimal arrangement of ocean current turbine generators in the ocean current power parks[J]. Current Applied Physics,2010,10(2):137-141.
- [50] O' DOHERTY D M,MASON-JONES A,MORRIS C E,et al. Interaction of marine turbines in close proximity[C]//European Wave and Tidal Energy Conference. Southampton:EWTEC,2011:1-8.
- [51] DIVETT T,VENNEL R,STEVENS C. Optimization of multiple turbine arrays in a channel with tidally reversing flow by numerical modelling with adaptive mesh[J]. Philos Trans A Math Phys Eng,2013,371(1985):20120251.
- [52] 高鹏. 潮流能资源评估与水轮机概化模拟研究[D]. 南京:河海大学,2018.
- [53] CHEN Y L,LIN B L,LIN J,et al. Effects of stream turbine array configuration on tidal current energy extraction near an island[J]. Computers and Geosciences,2015,77:20-28.
- [54] 袁鹏,刘小栋,王树杰,等. 潮流能水轮机阵列方式与其产能关系研究[J]. 可再生能源,2019,37(9):1406-1414. (YUAN Peng,LIU Xiaodong,WANG Shujie,et al. Research on relationship between arrangement of tidal turbines array and its actual power output[J]. Renewable Energy Resources,2019,37(9):1406-1414. (in Chinese))

- [55] BILBAO M, ALBA E. Simulated annealing for optimization of wind farm annual profit[C]//International Symposium on Logistics and Industrial Informatics. Linz:IEEE,2009:5258656.
- [56] 万春秋,王峻,杨耕,等. 动态评价粒子群优化及风电场微观选址[J]. 控制理论与应用,2011,28(4):449-456. (WAN Chunqiu, WANG Jun, YANG Geng, et al. Dynamic evaluation based particle swarm optimization and wind farm micrositeing[J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(4): 449-456. (in Chinese))
- [57] 吴国伟,武贺,汪小勇,等. 基于离散粒子群的潮流能涡轮机阵列优化研究[J]. 太阳能学报,2018,39(10):2713-2720. (WU Guowei, WU He, WANG Xiaoyong, et al. Study on tidal turbine array optimization based on discrete particle swarm algorithm[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2713-2720. (in Chinese))
- [58] 刘丞,汪昆,汪雄海. 基于粒子群算法的潮流发电机布局[J]. 浙江大学学报(工学版),2013,47(12):2087-2093. (LIU Cheng, WANG Kun, WANG Xionghai. Optimal deployment of tidal current turbines based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(12): 2087-2093. (in Chinese))
- [59] 吴亚楠,武贺,吴国伟,等. 潮流能涡轮机阵列优化离散量子粒子群算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(1):41-47. (WU Yanan, WU He, WU Guowei, et al. Quantum discrete particle swarm algorithm of tidal turbine array optimization[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(1): 41-47. (in Chinese))
- [60] 王丛佼,王锡淮,陈国初,等. 基于改进差分进化算法的潮流发电机组微观选址[J]. 电工技术学报,2016,31(15):99-108. (WANG Congjiao, WANG Xihuai, CHEN Guochu, et al. Tidal current turbines micrositeing based on improved differential evolution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 99-108. (in Chinese))
- [61] FUNKE S W, FARRELL P E, PIGGOTT M D. Tidal turbine array optimisation using the adjoint approach[J]. Renewable Energy, 2014, 63:658-673.
- [62] FUNKE S W, KRAMER S C, PIGGOTT M D. Design optimisation and resource assessment for tidal-stream renewable energy farms using a new continuous turbine approach[J]. Renewable Energy, 2016, 99:1046-1061.
- [63] 张继生,王雅,唐子豪,等. 舟山潮流能示范工程水轮机组选址与阵列优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):240-245. (ZHANG Jisheng, WANG Ya, TANG Zihao, et al. Site selection and layout optimization of turbines in the demonstration project of Zhoushan Tidal Stream Energy[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 240-245. (in Chinese))
- [64] 王雅. 潮流能资源评估与水轮机阵列布局优化研究:以舟山葫芦岛海域为例[D]. 南京:河海大学,2018.
- [65] ZHANG C, ZHANG J S, TONG L L, et al. Investigation of array layout of tidal stream turbines on energy extraction efficiency[J]. Ocean Engineering, 2020, 19:106775.
- [66] GONZÁLEZ-GORBEÑA E, QASSIM R Y, ROSMAN P C C. Optimisation of hydrokinetic turbine array layouts via surrogate modelling - ScienceDirect[J]. Renew Energy, 2016, 93:45-57.
- [67] GONZÁLEZ-GORBEÑA E, QASSIM R Y, ROSMAN P C C. Multi-dimensional optimisation of tidal energy converters array layouts considering geometric, economic and environmental constraints[J]. Renew Energy, 2017, 116:647-658.
- [68] GOSS Z L, PIGGOTT M D, KRAMER S C, et al. Competition effects between nearby tidal turbine arrays optimal design for alderney race[C]//International Conference on Renewable Energies Offshore. Lisbon: RENEW, 2019:255-262.
- [69] CHEN W B, LIU W C. Assessing the influence of sea level rise on tidal power output and tidal energy dissipation near a channel [J]. Renewable Energy, 2017, 101:603-616.
- [70] 袁鹏,刘林,司先才,等. 波流耦合环境下潮流能水轮机阵列对区域潮流特性影响研究[J]. 太阳能学报,2021,42(9):439-445. (YUAN Peng, LIU Lin, SI Xiancai, et al. Study on influence of tidal turbine array on regional tidal stream characteristics under wave-current coupling[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 439-445. (in Chinese))
- [71] PHOENIX A, NASH S. Optimisation of tidal turbine array layouts whilst limiting their hydro-environmental impact[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2019, 5(3):251-266.
- [72] DU FEU R J, FUNKE S W, KRAMER S C, et al. The trade-off between tidal-turbine array yield and impact on flow: a multi-objective optimisation problem[J]. Renewable Energy, 2017, 114:1247-1257.
- [73] DU FEU R J, FUNKE S W, KRAMER S C, et al. The trade-off between tidal-turbine array yield and environmental impact: a habitat suitability modelling approach[J]. Renewable Energy, 2019, 143:390-403.
- [74] GOSS Z L, COLES D S, PIGGOTT M D. Identifying economically viable tidal sites within the alderney race through optimization of levelized cost of energy[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378:20190500.
- [75] ZHANG J S, ZHANG C, ANGELOUDIS A, et al. Interactions between tidal stream turbine arrays and their hydrodynamic impact around Zhoushan Island, China[J]. Ocean Engineering, 2022, 246:110431.