

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514328

基于数据插值算法的潮流能发电装置 发电性能分析优化方法研究*

夏海南^{1,2}, 贾 宁^{1,2}, 郭 毅^{1,2}, 石建军^{1,2}, 刘松堂^{1,2}

(1. 国家海洋技术中心 天津 300112; 2. 自然资源部舟山潮流能野外科学观测研究站 天津 300112)

摘 要:潮流能发电装置发电性能的分析与评价工作对于促进潮流能发电技术的迭代升级至关重要。然而,对潮流能发电装置现场测试数据集分析时发现,数据集中的潮流流速数据和输出电功率数据并不都是相互匹配的,这不利于对潮流能发电装置的发电性能开展精细化分析与研究。鉴于此,在以往现场测试数据的基础上,采用萨维茨基-戈莱(SG)滤波算法、数据插值算法、对比分析、数理统计等方法,针对潮流能发电装置的输出功率、整机转换效率、年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标,开展潮流能发电装置发电性能分析优化方法研究。研究结果表明:SG 滤波方法对潮流流速数据的波动性具有较好的滤除效果,尤其是对处于显著震荡区间内的潮流流速数据的波动性滤除效果良好;插值后的潮流能发电装置输出功率散点图所表征的切入流速为 0.5 m/s,切入流速指标相对于插值前降低了约 7.4%;插值后的数据集的最大输出功率为 542.9 kW,相对于插值前的最大输出功率提高了约 0.6%;插值后的数据集的整机转换效率最大值约为 43.4%,相对于插值前的整机转换效率的最大值 42.6%,提高了约 1.9%;插值后的数据集与插值前的数据集的潮流能发电装置年发电量、容量系数、年等效满发小时数指标分别相差 700.8 kWh、0.000 2 和 1.6 h。研究成果期望为潮流能发电装置功率特性的精细化分析工作提供参考。

关键词:潮流能;潮流能发电装置;功率特性;现场测试;发电性能

中图分类号: TH17 TM761 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.6030

Research on optimization analysis method of power performance assessment for tidal energy converters based on data interpolation algorithms

Xia Hainan^{1,2}, Jia Ning^{1,2}, Guo Yi^{1,2}, Shi Jianjun^{1,2}, Liu Songtang^{1,2}

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Observation and Research Station of
Zhoushan Tidal Energy, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China)

Abstract: The analysis and evaluation of the power performance of tidal energy converters are crucial for promoting the iterative upgrading of tidal current energy generation technology. However, analysis of field testing datasets of tidal energy converters shows that the tidal current velocity data and output electric power data do not always have a one-to-one correspondence, which is not conducive to refined analysis of the power generation performance of tidal energy converters. In view of this, based on previous field test data, methods such as the Savitzky-Golay (SG) filtering algorithm, data interpolation algorithm, comparative analysis, and mathematical statistics were adopted to conduct research on the analysis methods of the power performance of tidal energy converters, focusing on indicators such as the output power, overall conversion efficiency, annual power generation, capacity factor, and annual equivalent full-load hours of the devices. The research results show that the SG filtering method has a good effect on filtering out the fluctuations of tidal current velocity data, especially for the tidal current velocity data in significantly oscillating intervals. The cut-in velocity characterized by the scatter plot of the output power of the tidal energy converter after interpolation is 0.5 m/s, and the cut-in velocity index is decreased by 7.4% compared with that before interpolation. The maximum output power in the dataset after interpolation is 542.9 kW,

收稿日期: 2025-07-29 Received Date: 2025-07-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(42542064)、自然资源部舟山潮流能野外科学观测研究站基金(ZSTE-2024DA05)、自然资源部海洋可再生能源产业发展(N3250NY10)项目资助

which is 0.6% higher than the maximum output power before interpolation. The maximum overall conversion efficiency in the interpolated dataset is approximately 43.4%, which is 1.9% higher than the maximum overall conversion efficiency of 42.6% before interpolation. The differences in the annual power generation, capacity factor, and annual equivalent full-load hours of the tidal energy converter between the datasets before and after interpolation are 700.8 kWh, 0.000 2, and 1.6 h, respectively. These findings provide a valuable reference for the refined performance analysis of tidal energy converters.

Keywords: tidal current energy; tidal energy converter; power characteristics; field testing; power performance

0 引 言

潮流能是清洁的海洋可再生能源的重要组成部分,其开发与利用可减少人类社会对化石燃料的消耗与依赖^[1]。潮流能发电技术作为潮流能开发与利用的重要领域,对于推动全球能源结构转型升级、助力我国“双碳”目标的实现等均发挥着不可替代的重要作用^[2]。我国海岸线漫长、潮流能资源禀赋优越^[3],根据原国家海洋局2004年组织的“我国近海海洋综合调查与评价”专项调查结果^[4],我国近海潮流能资源的理论装机容量约为8.33 GW。2025年2月,自然资源部等六部委联合印发《关于推动海洋能规模化利用的指导意见》,明确提出要大力支持潮流能等海洋能的规模化开发与利用。另外,我国在国家重点研发计划、海洋可再生能源专项资金等项目的支持下,已经开展了潮流能发电技术的研究和潮流能发电装置的现场测试与评价工作^[5-8]。

潮流能发电装置额定流速的设计关乎潮流能发电装置年发电量的实际产出^[9],Lewis等^[10]针对水平轴潮流能发电装置额定流速的设计问题,研究了潮流能发电装置设计的切入流速与额定流速的关系,并结合全球的潮汐数据,研究了不同海洋环境下潮流能发电装置额定流速的最佳设计区间。Harrold等^[11]针对测试的400 kW潮流能发电装置,采用传统的放在海底的流速传感器和直接安装在涡轮机上的流速传感器两种测量方式,研究了不同测量方式对潮流能发电装置发电性能评估的影响。Evans等^[12]以一台额定功率为1 MW的DEEP-Gen IV潮流能发电装置为研究对象,研究了测试海域内不同流速测量位置的潮流流速剖面变化情况,并分析了潮流流速剖面对潮流能发电装置功率特性测量结果的影响。王项南等^[13]针对LHD-L-1000型潮流能发电装置,开展了实海况测试工作,并从功率特性和电能质量特性两方面对其发电性能开展了综合分析与评价。董航等^[14]针对振荡水翼式潮流能发电装置中柔性水翼的形变测量问题,基于高速相机的非接触式测量系统,提出了一种基于Canny算子的水翼迎流面边缘检测方法,从而可计算出水翼迎流面边缘上任一点的形变。此外,还有许多科研人员开展了潮流能发电装置现场测试与发电性能的分析与研究工作^[15-16]。

潮流能发电装置的现场测试与评价工作,尤其是针对潮流能发电装置发电性能指标开展的现场测试与评价工作,不仅是连接实验室研发与实际海洋应用的关键纽带^[17],而且是衡量潮流能发电装置整机经济性、可靠性、稳定性等指标的重要依据^[18]。潮流能发电装置功率特性指标的现场测试与评价工作,能够在真实的海洋环境中衡量潮流能发电装置的发电性能,可促进潮流能发电技术的提高与迭代升级,进而推动潮流能发电装置从“实验室样机”到“工程化应用”的转变^[19]。

然而,在潮流能发电装置发电性能现场测试工作中,由于潮流流速数据大都是采用流速测量设备内部电池供电的自容模式来获取的^[20],这势必会导致潮流流速数据的采样时间间隔受制于流速测量设备内部电池的供电能力,而潮流能发电装置输出的电功率数据大都是依靠岸电供电的电功率测量设备采用直读模式来获取的^[21],电功率数据的采样间隔不受供电条件制约。鉴于此,现行的国家标准《潮流能发电装置功率特性现场测试方法》(GB/T 41342—2022)要求的潮流流速数据和电功率数据的采样间隔也有所差异^[22]。但由此便导致了在潮流能发电装置功率特性现场测试工作中,潮流流速数据的采样间隔可能会大于潮流能发电装置输出电功率数据的采样间隔,进而导致了在同一测试周期内,获取的现场测试数据集中可能会存在电功率数据数量大于潮流流速数据数量的情况出现,而依据国家标准对潮流能发电装置的发电性能指标进行计算与分析时,不得不将没有对应潮流流速的电功率数据舍弃^[23],这不利于对潮流能发电装置的功率特性指标开展精细化分析与评估。此外,国内外相关科研人员针对该技术问题的研究也不是很多。

鉴于此,针对潮流能发电装置现场测试数据集中的潮流流速数据与输出功率数据并不都是相互对应的这一技术问题,面向潮流能发电装置功率特性精细化分析的实际需求,在以往潮流能发电装置功率特性现场测试工作和相关研究成果的基础上^[24-25],采用滤波算法、数据插值算法、对比分析、数理统计等方法,开展潮流能发电装置发电性能的分析优化方法研究,以期为我国潮流能发电装置功率特性的精细化分析工作提供参考。

1 研究方法

1.1 流速数据滤波方法

声学多普勒流速剖面仪 (acoustic Doppler current profiler, ADCP) 目前广泛应用于潮流能资源评估和潮流能发电装置发电性能现场测试工作中^[26]。ADCP 主要依靠多普勒效应和声波的散射原理来进行潮流流速的测量,但在实际潮流流速测量工作中,由于测量仪器本身的误差、海水中的气泡和湍流等因素导致了 ADCP 获取的数据具有一定的波动性^[27]。鉴于此,为了保证对潮流能发电装置发电性能分析结果的可靠性,有必要对 ADCP 获取的数据进行滤波。

萨维茨基-戈莱 (Savitzky-Golay, SG) 滤波是一种基于多项式最小二乘拟合的滑动窗口滤波方法,核心优势是在平滑降噪的同时,能最大限度保留信号的高阶统计特性,能够在对 ADCP 获取的潮流流速数据进行滤波处理的同时,还能保证潮流流速数据的变化特征^[28]。SG 滤波的基本思路是:在一个固定大小的滑动窗口内,用低阶多项式对窗口内的数据点进行拟合,然后用拟合多项式在窗口中心位置的预测值作为该点的滤波结果。通过滑动窗口遍历整个信号,最终得到平滑后的序列。其主要步骤^[29]为:

1) 设滑动窗口包含 $2m+1$ 个数据点,窗口半宽为 m ,窗口内数据为 $(y_{-m}, y_{-m+1}, \dots, y_0, \dots, y_{m-1}, y_m)$, 其中 y_0 为窗口中心点。用一个 n 阶多项式来拟合这些数据点,同时为了避免过度拟合,多项式的阶数 n 需小于 $2m+1$ 。 n 阶多项式如式(1)所示。

$$y_{(x)} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

式中: x 是相对窗口中心的位置索引。

2) 通过最小二乘法求解式(1)中的多项式系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_n , 使拟合值与原始数据的平方误差最小,如式(2)所示。

$$\min_{k=-m}^m [y_{(x=k)} - y_k]^2 \quad (2)$$

3) 由于窗口中心位置位于 $x=0$, 此时拟合多项式的值为 $y_{(0)} = a_0$ 。因此,处于窗口中心位置数据的滤波结果为系数 a_0 。滑动窗口后,重复上述过程,得到整个测试期间获取的潮流流速数据的平滑结果。

1.2 潮流流速数据插值方法

采用 SG 滤波方法对获取的潮流流速数据进行平滑滤波后,将滤波后的潮流流速数据和电功率测量设备获取的电功率数据,按照数据获取的时间标签进行匹配,形成时间轴相互对应的现场测试数据集,如式(3)所示。

$$(v_i, p_j) \in \{(v_1, p_1), (v_2, p_{2+\Delta t}), \dots, (v_i, p_{i+(i-1)\Delta t})\} \quad (3)$$

式中: Δt 为潮流流速数据和电功率数据之间的数据个数差值; i 为潮流流速数据的序号; j 为电功率数据的序号。

由式(3)可知, Δt 即为潮流流速数据 v_i 与 v_{i+1} 之间需要插值的个数。按照潮流流速数据的时间轴,对 v_i 与 v_{i+1} 之间的潮流流速数据进行插值,需要插值的个数为 Δt 。由于 Akima 数据插值法能够避免线性插值法的粗糙,又克服了三次样条插值法可能会出现过度震荡的情况,同时兼具高效、局部稳健的特点^[30],因此采用 Akima 插值法对潮流流速数据进行插值。

Akima 插值法的主要思路为:把流速区间 $[v_i, v_{i+1}]$ 划分成 l 个小区间,在划分的每个小区间内构造一个三次多项式,并求解多项式的系数,进而完成该区间数据的插值。根据建立的三次多项式通过已知的数据点和在数据节点处的一阶导数连续等约束条件,能够确定建立的三次多项式系数。其中, Akima 插值法构建的三次多项式如式(4)所示。

$$f_b(x) = \alpha'_b(x - x_b)^3 + \beta'_b(x - x_b)^2 + \chi'_b(x - x_b) + \delta'_b \quad (4)$$

式中: b 是划分的小区间的序号; α'_b 、 β'_b 、 χ'_b 、 δ'_b 为所划分的第 b 个区间内的三次多项式系数。

1.3 发电性能评估方法

本文对潮流流速数据进行插值后,结合电功率测量设备获取的潮流能发电装置输出电功率数据,对潮流能发电装置的发电性能进行评估。本文主要针对整机转换效率、输出功率散点图、年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标对潮流能发电装置的发电性能进行评估。需要说明的是:根据现行国家标准《潮流能发电装置功率特性现场测试方法》^[22],潮流能发电装置的功率特性是衡量潮流能发电装置发电能力的重要指标,主要包括:输出功率、转换效率和年发电量这 3 个指标。在分析了潮流能发电装置发电性能评估需求的基础上,在功率特性分析指标的基础上,额外增加了容量系数和年等效满发小时数这两个指标,以期能够相对全面地分析潮流能发电装置的发电性能。

整机转换效率是衡量潮流能发电装置将捕获到的潮流能量转换为电能的能力。对潮流能发电装置整机转换效率的计算是从潮流流速的输入端到潮流能发电装置逆变器的输出端,即整个潮流能发电装置的转换效率。本文对潮流能发电装置整机转换效率的计算方法如式(5)所示。

$$\eta_j = \frac{\rho A v_j^3}{2 P_j} \quad (5)$$

式中: η_j 为第 j 个潮流能发电装置的整机转换效率; A 为潮流能发电装置的能量捕获截面积,单位为 m^2 ; v_j 为潮流流速,单位为 m/s ; P_j 为第 j 个潮流能发电装置输出的电功率数据,单位为 kW ; ρ 为测试海域的海水密度,单位为 kg/m^3 。

输出功率散点图是以潮流流速为 x 轴、以潮流能发电装置输出电功率为 y 轴绘制的图谱。潮流能发电装置输出功率散点图能够直观地表征潮流能发电装置的输出功率随着潮流流速数据的变化情况,可用于分析潮流能发电装置的发电性能。

年发电量是依据测试数据对潮流能发电装置在一年的时间尺度内所能发出的电能进行估算,是衡量潮流能发电装置整体经济性能的重要指标。潮流能发电装置年发电量的估算方法如式(6)所示。

$$AEP = \int_{v_1}^{v_2} 8\,760 \times \delta \times P(v) \times f(v) dv \quad (6)$$

式中: AEP 为潮流能发电装置的年发电量,单位为 kWh; v_1 为潮流能发电装置的切入流速,单位为 m/s; v_2 为潮流能发电装置的切出流速,单位为 m/s; $P(v)$ 为潮流能发电装置的功率曲线; $f(v)$ 为流速概率密度函数; δ 为潮流能发电装置的可利用率,单位为 %。

容量系数以潮流能发电装置在一定时间内的实际发电量与额定功率下满发电量的比值,是反映潮流能发电装置对海域内潮流能资源实际利用效率的重要指标之一。需要说明的是,容量系数受能源类型、资源条件、设备特性影响显著。潮流能发电装置容量系数的计算方法如式(7)所示。

$$CF = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \int_{v_1}^{v_2} P(v) \times f(v) dv dt}{P_e \times (t_2 - t_1)} \quad (7)$$

式中: CF 为潮流能发电装置的容量系数; P_e 为潮流能发电装置的额定功率,单位为 kW; t_1 为容量系数统计的开始时间,单位为 h; t_2 为容量系数统计的结束时间,单位为 h。

年等效满发小时数是指:潮流能发电装置在一年内的时间尺度内,装置的实际发电量相当于其以额定功率(设计最大输出功率)持续运行的总时长。它直观反映了设备的实际发电能力与“理想满负荷状态”的匹配程度。年等效满发小时数的数值越高,说明装置的资源利用效率或运行稳定性越好。潮流能发电装置年等效满发小时数的计算方法如式(8)所示。

$$H_y = \frac{AEP}{P_e} \quad (8)$$

式中: H_y 为潮流能发电装置的年等效满发小数,单位为 h; P_e 为潮流能发电装置的额定功率,单位为 kW; AEP 为潮流能发电装置的年发电量,单位为 kWh。

2 现场测试

潮流能发电装置的现场测试工作位于潮流能资源较为丰富的浙江省舟山市普陀山与葫芦岛之间的海域。相

关研究人员已经对该海域的水深、地形、潮流能资源特性等方面的具体情况开展了大量的研究^[31]。另外,该海域属于典型的狭窄水道地形,受岛屿屏障和海底地形影响。根据潮流能资源评估结果,该海域的潮流能理论功率由南向北呈现递增趋势,北侧瞬时理论功率为 92 MW^[32]。被测试的潮流能发电装置采用桩柱式安装结构在该海域开展示范运行与并网发电工作。被测试的潮流能发电机叶轮扫掠直径为 18.5 m,变流器额定功率为 1 000 kW,发电机的额定输出电压为 690 V,发电机的额定功率为 450 kW。需要特别说明的是,在潮流能发电装置现场测试期间,为了衡量被测试潮流能发电装置的发电能力,在保障潮流能发电装置电气系统安全的前提下,现场测试期间并未对潮流能发电装置的输出功率进行控制,即现场测试期间能够获取超过 450 kW 的输出功率数据。

本次潮流能发电装置的现场测试工作依据现行的《潮流能发电装置功率特性现场测试方法》国家标准(GB/T 41342—2022)对潮流能发电装置开展现场测试工作^[22]。选用行业内普遍使用的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)和电能质量分析仪对测试海域的潮流流速和潮流能发电装置输出的电功率进行测量。整个测试工作持续 46 天,ADCP 每间隔 5 min 发射 60 个声学脉冲,电能质量分析仪每间隔 1 min 保存一组 60 个电功率数据的平均值。潮流能发电装置的现场测试工作,如图 1 所示。



图1 潮流能发电装置现场测试

Fig. 1 Field test of a tidal energy converter

3 结果与分析

3.1 插值必要性分析

为了更加直观地表征本次现场测试期间获取的潮流流速数据和潮流能发电装置输出功率数据之间的对应关系,本文将两组数据的时间轴相对应,以数据的序号为横坐标,分别以潮流流速数据和电功率数据为纵坐标,绘制

现场测试期间的部分潮流流速数据和电功率数据的对应关系图,结果如图 2 所示。

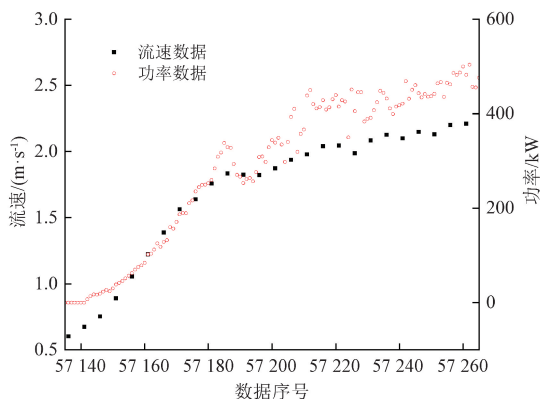


图 2 部分测试数据匹配图

Fig. 2 Partial field test data matching of the tidal energy converter

通过对图 2 中截取的部分现场测试数据可知,在每个 5 min 的测试时间间隔内,ADCP 获取了 1 组潮流流速数据而电能质量分析仪获取了 5 组电功率数据,当根据《潮流能发电装置功率特性现场测试方法》国家标准(GB/T 41342—2022)对潮流能发电装置的整机转换效率等功率特性指标进行计算时^[22],由于部分输出功率数据没有对应的潮流流速数据,故而无法衡量部分输出功率数据所对应的潮流能发电装置整机转换效率指标,进而不能够全面地评价潮流能发电装置的整机转换效率等发电性能指标。鉴于此,有必要对潮流能发电装置功率特性现场测试工作中的潮流测试数据插值算法进行研究,进而为全面地分析与评价潮流能发电装置的发电性能指标提供数据支撑。

3.2 潮流数据滤波

ADCP 在对潮流流速进行测量时,由于海水中的湍流、气泡等因素的存在,导致了获取的潮流流速数据具有一定的波动性。因此,有必要对获取的潮流流速数据进行滤波。现场测试期间,累积获取了 12 000 余组潮流流速数据,若在一个图谱中展示获取的 12 000 组数据,并不能很好地表征滤波效果。鉴于此,本文截取了部分数据绘制了滤波前后潮流流速数据的对比分析图,结果如图 3 所示。

通过对图 3 中截取的部分潮流流速数据可知,SG 滤波方法能够很好地将获取的潮流流速数据中的波动性进行滤除,尤其是对处于较为明显的震荡区间内的潮流流速数据具有较好的滤波效果。此外,由图 3 也可分析出,SG 滤波方法在对数据进行滤波的同时,也保留了潮流流速数据的关键变化特征,这有利于对潮流能发电装置的发电性能进行精细化分析。本文对潮流能发电装置发电性能的进一步分析也是基于滤波后的潮流流速数据。

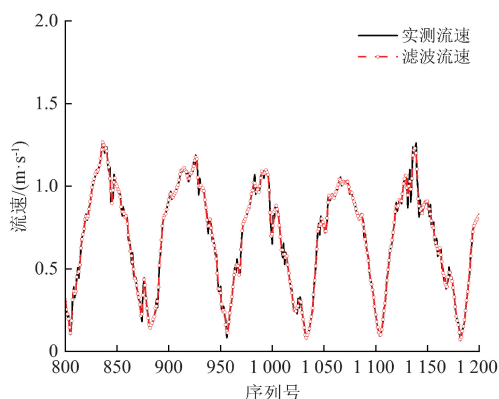


图 3 实测流速与滤波流速对比

Fig. 3 Comparison plot of measured velocity and filtered velocity

3.3 输出电功率分析

对潮流流速数据进行滤波后,按照潮流能发电装置输出功率数据的时间轴,采用 Akima 插值法,对潮流流速进行插值,填补与潮流能发电装置输出功率数据相对应的潮流流速数据,在对数据进行质量控制的基础上,绘制插值前与插值后的潮流能发电装置输出功率数据对比散点图,结果如图 4 所示。

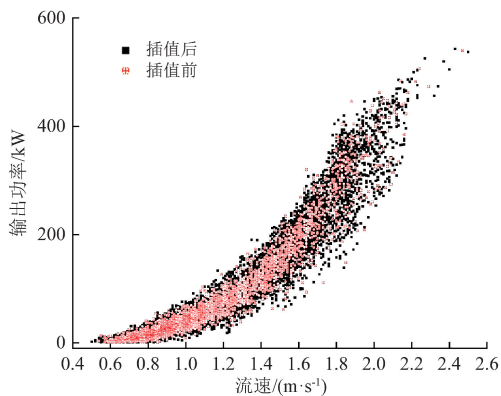


图 4 输出电功率数据对比散点图

Fig. 4 Comparison of output power in scatter-plot form

通过对图 4 进行分析可知,从散点图的整体分布上来看,潮流流速插值后的输出功率散点图与插值前的输出功率散点图均能够表明该潮流能发电装置的切入流速约为 0.5~0.6 m/s、现场测试期间获取的最大输出功率数据约为 540 kW。然而,为了细致地对比分析插值前后的输出功率散点图之间的差异,本文将潮流流速划分成潮流流速不超过 0.5 m/s、潮流流速处于 0.5~2.2 m/s、潮流流速>2.2 m/s 这 3 个阶段。首先,分析图 4 中的潮流流速不超过 0.5 m/s 范围的散点图可知,插值前的输出功率散点图表征的潮流能发电装置的切

入流速为 0.54 m/s,插值后的输出电功率散点图表征的切入流速为 0.5 m/s,切入流速数据较插值前降低了 7.4%。其次,分析图 4 中的潮流流速处于 0.5~2.2 m/s 范围的散点图进行分析可知,插值前后的输出电功率散点图之间并未有显著地差异。最后,分析图 4 中的潮流流速>2.2 m/s 范围的散点图可知,虽然插值前后的输出电功率散点图均表征潮流能发电装置的最大输出电功率约为 540 kW,但是插值后的输出电功率散点图更加细致地刻画了潮流能发电装置输出电功率数据的变化情况。

此外,为了量化差值前与插值后的潮流能发电装置输出电功率数据的变化情况,本文统计了插值前与插值后的潮流能发电装置输出电功率数据集中的输出电功率数据的分布情况,计算了输出电功率数据集的数据数量、平均值、中位数、最大值、最小值、变异系数等数据,结果如表 1 所示。

表 1 插值前与插值后的输出电功率数据统计表

Table 1 Statistical data of output power before and after interpolation

指标	插值前	插值后
数据数量	3 649	18 247
最大值/kW	539.6	542.9
最小值/kW	1.1	1.0
平均值/kW	96.4	96.6
中位数/kW	60.5	60.9
平均绝对偏差/kW	74.1	74.0
变异系数	0.974	0.973

通过对表 1 进行分析可知,插值后的潮流能发电装置输出电功率数据集的输出电功率数据数量约是插值前的 5 倍,这也反映了插值后的数据集能够更加细致地刻画潮流能发电装置输出电功率随着潮流流速的变化情况。插值前的数据集的输出功率变化范围为 1.1~539.6 kW,相对于插值后 1.0~542.9 kW 更小,由此可以推断出,插值后的数据集的输出电功率数据的分布范围相对更广,尤其是潮流能发电装置最大输出功率数据相对于插值前提高了 3.3 kW,为插值前最大输出电功率数据的 0.6%。此外,表 1 中的中位数指标可知,插值后的中位数大于插值前的中位数,这表明插值后的数据集中有一半的数据>60.9 kW,高于插值前的 60.5 kW。对表 1 中插值后的平均绝对偏差和变异系数均小于插值前的相应数值,这表明插值后的数据集中的电功率数据的“波动幅度”反而更小,即数据的离散性更低。

3.4 整机转换效率分析

整机转换效率是潮流能发电装置功率特性的重要指标之一。为了分析插值前与插值后数据集中潮流能发电装置转换效率指标的变化情况,本文绘制了整机转换效率对比散点图,结果如图 5 所示。

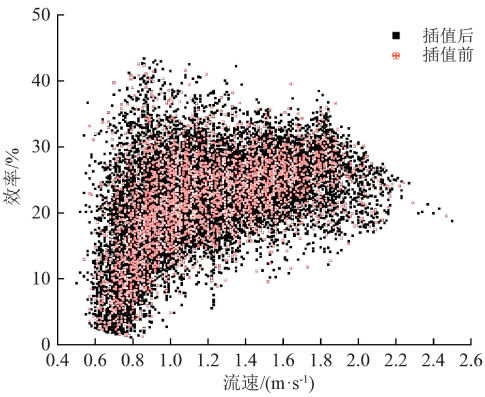


图 5 整机转换效率数据对比散点图

Fig. 5 Scatter plot comparing overall conversion efficiency

通过对图 5 进行分析可知,从散点图的整体分布上来看,分别应用插值前的数据集和插值后的数据集对潮流能发电装置的整机转换效率进行分析时,两组数据集所表征的整机转换效率数据的变化趋势并没有显著差异。即潮流能发电装置的整机转换效率数据均是呈现出先增大后减小的趋势。另外,当潮流流速处于 0.5~0.9 m/s 时,整机转换效率数据的波动性相对较大,这说明潮流能发电装置的整机转换效率数据在低流速条件下具有显著地波动性。该波动性的可能原因是与潮流流速的变化机制有关,这将是笔者后续研究的主要内容之一。

对图 5 进行分析还可以发现,由于插值后的散点图的数据量增加,导致了整机转换效率散点图的连续性更好,尤其是当潮流流速超过 2.2 m/s 时,插值后的整机转换效率散点图更加细腻地表征整机转换效率数据的降低趋势。另外,通过对两组数据集的原始数据进行分析发现,插值后的数据集的整机转换效率最大值约为 43.4%,相对于插值前的整机转换效率的最大值 42.6%,提高了约 1.9%。综上可以分析出,插值后的数据集能够更加细腻地表征整机转换效率数据的变化趋势,且提高了潮流能发电装置最大整机转换效率数据的计算结果。

为了更进一步的精细化分析潮流能发电装置的整机转换效率数据在插值前后的变化情况,本文分别绘制了潮流能发电装置在插值前与插值后的整机转换效率直方图。在直方图的绘制过程中,将整机转换效率数据的区间划分长度设定为 2%,并统计整机转换效率数据在每个区间内的分布频率,结果如图 6 和 7 所示。

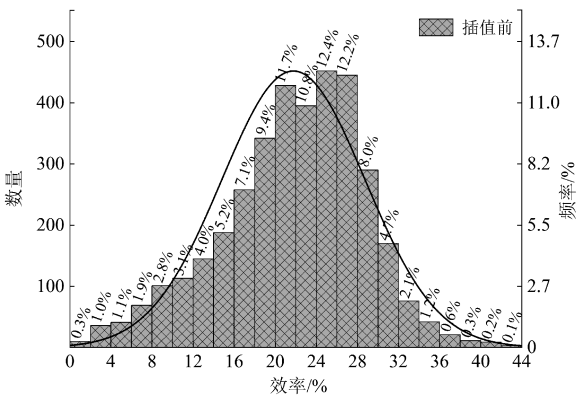


图 6 插值前整机转换效率数据直方图

Fig. 6 Histogram of conversion efficiency data before interpolation

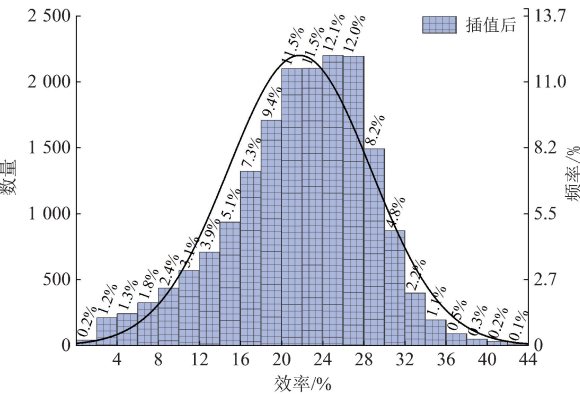


图 7 插值后整机转换效率数据直方图

Fig. 7 Histogram of conversion efficiency data after interpolation

图 6 和 7 中的实线均表示正态分布曲线,通过正态分布曲线与直方图的位置关系可知,潮流能发电装置整机转换效率数据的分布频率并未严格服从正态分布规律,尤其是两组图谱的波峰均偏向正态分布曲线波峰的右侧,这表明潮流能发电装置整机转换效率数据的分布频率相对于正态分布曲线而言,更加集中于转换效率偏大的区域。另外,通过图 6 和 7 的分析可知,潮流能发电装置整机转换效率数据的分布频率随着转换效率的增大而呈现出先增大后减小的分布趋势,当整机转换效率数据处于 24%~26% 时,两组图谱所表征的转换效率数据的分布频率均达到了最大值。然而,图 6 所表征的整机转换效率数据分布频率在 22%~24% 范围出现了显著的“跌落”,而图 7 却没有这种情况出现,因此可以推断出,插值后的数据集更加细腻地刻画了潮流能发电装置整机转换效率数据的变化情况。

3.5 年发电量等指标分析

通过式 (6)~(8) 可知,潮流能发电装置的年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标之间具有一定的相关性。因此,本文将潮流能发电装置的年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标统一进行计算与分析,各个指标的计算结果如表 2 所示。

表 2 插值前与插值后的年发电量等指标计算结果

Table 2 Calculation results of annual energy production and other parameters before and after interpolation		
指标	插值前	插值后
年发电量/kWh	337 785. 6	338 486. 4
容量系数	0.085 7	0.085 9
年等效满发小时/h	750. 6	752. 2

通过对表 2 的分析可知,在一年的时间尺度内,应用插值后的数据集和插值前的数据集对潮流能发电装置年发电量估算结果相差 700. 8 kWh;对于潮流能发电装置的容量系数指标而言,应用插值后的数据集和插值前的数据集的计算结果之间数值相差 0. 000 2;对于潮流能发电装置年等效满发小时数指标,应用插值后的数据集和插值前的数据集的计算结果之间相差 1. 6 h。综合以上数据可知,应用插值后的数据集和插值前的数据集对潮流能发电装置的年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标计算时,插值后的数据集的计算结果相比插值前均有所提高,只是提高的幅度有所不同。

值得特别说明的是,针对潮流能发电装置整机转换效率、输出功率散点图、年发电量、容量系数和年等效满发小时数等发电性能指标的定量分析结果是基于本次测试的潮流能发电装置,若针对不同的潮流能发电装置,本优化方法对其发电性能指标的定量分析结果可能会有差异,但从刻画发电性能指标的变化情况这一定性的角度而言,本发电性能分析优化方法能够细腻地表征任何被测试的潮流能发电装置发电性能的变化情况。另外,由于被测试潮流能发电装置的年发电量、整机转换效率、容量系数、年等效满发小时数等指标均是依据现场测试数据进行计算得出,其计算结果受到测试期间的天气状况(如台风影响停机)、装置的维修保养、现场测试的时间窗口等多种因素影响。而且,本次潮流能发电装置现场测试期间,装置就因遭受台风的影响而停机,这都对潮流能发电装置年发电量的估算、容量系数等指标的计算结果等产生了影响。

4 结 论

潮流能发电装置发电性能的现场测试与评价工作对于科学衡量潮流能发电装置的发电能力、促进潮流能发电装置发电技术的提高与优化等发挥着重要作用。然而,在对现场测试数据进行处理时发现,潮流能发电装置现场测试数据集中潮流流速数据与输出电功率数据并不都是相互对应的,这不利于对潮流能发电装置的发电性能进行精细化分析与评估。鉴于此,本文在以往开展潮流能发电装置现场测试工作和相关研究成果的基础上,采用 SG 滤波算法、数据插值算法等方法,分别应用插值前的数据集和插值后的数据集对潮流能发电装置的输出功率、整机转换效率、年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标进行计算与分析,可得出以下结论:

1) 本文尝试将 SG 滤波方法应用于潮流流速数据的处理中,研究表明该滤波算法对处于较为明显的震荡区间内的潮流流速数据具有较好的滤波效果,并且该算法在对潮流数据进行滤波的同时,能够保留潮流流速数据的关键变化特征。

2) 插值后的数据集所表征的切入流速指标相对于插值前降低了约 7.4%。插值后的数据集中的输出电功率数据的分布范围相对于插值前更广,且电功率数据的离散性更低。

3) 插值前和插值后的数据集均表明潮流能发电装置的整机转换效率数据在低流速条件下具有显著地波动性,但插值后的数据集能够更加细腻地表征整机转换效率数据的变化趋势,且潮流能发电装置的最大转换效率指标相对于插值前提高了约 1.9%。

4) 应用插值前的数据集和插值后的数据集会导致对潮流能发电装置的年发电量、容量系数、年等效满发小时数等指标的计算结果之间存在一定的差异,只是差异的幅度有所不同。

综上所述,本文提出了基于数据插值算法的潮流能发电装置发电性能分析优化方法,通过对潮流流速数据进行波动性滤除、填补与输出电功率所对应的潮流流速数据等途径,使得精细地分析潮流能发电装置的发电性能成为可能,也为科学准确地评估潮流能发电装置的发电性能指标提供了参考。

参考文献

[1] SUAREZ L, GUERRA M, WILLIAMS M E, et al. Tidal energy resource assessment in the Strait of Magellan in the Chilean Patagonia [J]. *Renewable Energy*, 2025,

252(12): 123430.

- [2] XU SH J, YU F Y, ZHANG X F, et al. Investigation of temporal and spatial distribution of tidal energy in Liuheng waterway via coastal acoustic tomography [J]. *Renewable Energy*, 2025, 240(9): 122180.
- [3] 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 J SH, WANG G H, LIN X F. 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.
- [4] 韩家新. 中国近海海洋——海洋可再生能源[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- HAN J X. China's offshore ocean-marine renewable energy [M]. Beijing: Ocean Press, 2015.
- [5] 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 L, LI ZH CH. 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.
- [6] 褚景春, 贾法勇. 中国海洋潮流能发电技术与装备现状、新的机遇与挑战[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(8): 668-674.
- CHU J CH, JIA F Y. Present situation, new opportunities and challenges of ocean tidal current energy power generation technology and equipment in China [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2024, 45(8): 668-674.
- [7] 李伟, 史宏达, 刘臻, 等. 中国海洋能研究现状及未来发展建议[J]. *太阳能*, 2024(7): 79-88.
- LI W, SHI H D, LIU ZH, et al. Research progress of ocean energy in China and its development proposals [J]. *Solar Energy*, 2024(7): 79-88.
- [8] 王项南, 贾宁, 夏海南, 等. 我国海洋能发电装置的测试和评价[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(6): 87-90.
- WANG X N, JIA N, XIA H N, et al. Testing and evaluation of China's marine energy generating devices [J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(6): 87-90.
- [9] 谭俊哲, 郎成鹏, 袁鹏, 等. 低流速小型潮流能水轮机导流罩性能分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2025, 55(7): 87-95.
- TAN J ZH, LANG X P, YUAN P, et al. Performance

- analysis of diffuser for small tidal current turbines under low flow velocity[J]. Periodical of Ocean University of China, 2025, 55(7): 87-95.
- [10] LEWIS M, MCNAUGHTON J, MÁRQUEZ-DOMINGUEZ C, et al. Power variability of tidal-stream energy and implications for electricity supply[J]. Energy, 2019, 183: 1061-1074.
- [11] HARROLD M, OURO P, O'DOHERTY T. Performance assessment of a tidal turbine using two flow references[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 624-633.
- [12] EVANS L, ASHTON I, SELLAR B. Tidal turbine power performance assessments following IEC TS 62600-200 using measured and modelled power outputs[J]. Renewable Energy, 2023, 212: 138-150.
- [13] 王项南, 张原飞, 夏海南, 等. 我国自主研发潮流能发电装置的现场测试与评价分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 226-234.
- WANG X N, ZHANG Y F, XIA H N, et al. Field test and evaluation of self-developed tidal power generation device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 226-234.
- [14] 董航, 黎明, 曲恒良, 等. 基于数字图像处理的柔性水翼形变测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 196-203.
- DONG H, LI M, QU H L, et al. Deformation measurement of flexible hydrofoil based on digital image processing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 196-203.
- [15] LIU ZH, SONG X Y, ZHU Y SH. Energy-harvesting performance of a fully-passive coupled-pitching hydrofoil: A numerical study[J]. Applied Ocean Research, 2025, 156(1): 104468.
- [16] NGUYEN M H, JEONG H, TRAN H H, et al. Energy capture evaluation of tidal current turbines arrays in Uldolmok strait, South Korea[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106675.
- [17] XIA H N, WANG X N, LI Q, et al. Research on analysis method of measurement uncertainty in the power performance assessment of tidal energy converters[J]. Energy Reports, 2023, 9: 5688-5693.
- [18] KO D H, GE Y ZH, PARK J S, et al. A comparative study of laws and policies on supporting marine energy development in China and Korea[J]. Marine Policy, 2022, 141: 105057.
- [19] 王项南, 俞彦辉, 夏海南. 波浪能发电装置功率特性现场测试分析优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 70-76.
- WANG X N, YU Y H, XIA H N. Research on power characteristic field test analysis method of wave energy generation device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 70-76.
- [20] LU H ZH, WANG X N, BAI ZH G, et al. FVCOM-CFD model-based study of hydraulic turbine arrays in Mount Putuo tidal current energy test site[J]. Ocean Engineering, 2024, 312(3): 119079.
- [21] WANG X N, XIA H N, GUO Y, et al. Research on field testing and assessment technology of ocean energy converters[J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115539.
- [22] 全国海洋标准化技术委员会. 潮流能发电装置功率特性现场测试方法: GB/T 41342—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Marine Standardization Technical Committee. Site testing method for power performance of electricity producing tidal energy converters: GB/T 41342—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [23] 夏海南, 王项南, 张原飞, 等. 水平轴潮流能发电装置功率特性现场测试分析优化方法优化及应用[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 95-100.
- XIA H N, WANG X N, ZHANG Y F, et al. Optimization and application of site test and analysis method for power characteristics of horizontal axis tidal energy converters[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2022, 43(3): 95-100.
- [24] 夏海南, 王项南, 李强, 等. 潮流能发电装置输出功率异常数据识别方法研究及应用[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 472-476.
- XIA H N, WANG X N, LI Q, et al. Research and application of abnormal data identification method of output power for tidal energy converters[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2022, 43(8): 472-476.
- [25] 董宇航, 王项南, 白志刚, 等. 基于 FVCOM 模型的潮流能发电装置输入能量计算[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(5): 86-91.
- DONG Y H, WANG X N, BAI ZH G, et al. The input energy calculation of tidal current power generation device based on FVCOM model[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(5): 86-91.
- [26] ROBINS P E, NEILL S P, LEWIS M J, et al. Characterising the spatial and temporal variability of the tidal-stream energy resource over the northwest European

- shelf seas[J]. Applied Energy, 2015, 147: 510-522.
- [27] MCVEY J R, KILCHER L, THOMSON J, et al. Turbulence measurements at three potential tidal energy sites in the Salish Sea[J]. Applied Ocean Research, 2025, 158: 104561.
- [28] 尹兴超, 郭瑜, 樊家伟, 等. 增量式光学编码器 IAS 信号误差建模及补偿[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 50-58.
- YI X CH, GUO Y, FAN J W, et al. Error modeling and compensation of IAS signal for incremental optical encoders[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2023, 44(2): 50-58.
- [29] 何昕, 王经义. 基于 S-G 滤波算法的航空器着陆阶段滑行轨迹修正研究[J]. 现代计算机, 2024, 30(8): 108-111.
- HE X, WANG J Y. Research on aircraft taxi trajectory correction during landing stage based on S-G filter algorithm[J]. Modern Computer, 2024, 30(8): 108-111.
- [30] 竺明星, 尹倩, 龚维明, 等. 基于 Akima 插值理论的水平试桩数据处理方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 80-84.
- ZHU M X, YIN Q, GONG W M, et al. Data processing method for laterally loaded trial piles based on Akima interpolation theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 80-84.
- [31] 武贺. 潮流能资源精细化评估及微观选址方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- WU H. Study on elaborate assessment of tidal current energy resource and micro siting of tidal farm [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [32] 吴亚楠, 武贺, 封哲. 普陀山-葫芦岛水道潮流能资源评估[J]. 可再生能源, 2017, 35(10): 1566-1573.
- WU Y N, WU H, FENG ZH. Assessment of tidal current energy resource at Putuo Mountain-Hulu Island waterway[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10): 1566-1573.

作者简介



夏海南(通信作者), 2012 年于大连海洋大学获得学士学位, 2015 年于大连海洋大学获得硕士学位, 现为国家海洋技术中心高级工程师, 主要研究方向为海洋能发电装置现场测试与分析评价技术。

E-mail: xiahainan@126.com

Xia Hainan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Dalian Ocean University in 2012, his M. Sc. degree from Dalian Ocean University in 2015. He is currently a senior engineer in National Ocean Technology Center. His main research interests include field testing and assessment technology for ocean energy converters.