

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514010

基于不确定性分析的潮流能发电装置 输出功率预测方法研究^{*}

夏海南^{1,2}, 王项南^{1,2}, 郭毅^{1,2}, 贾宁^{1,2}, 陈强³

(1. 自然资源部舟山潮流能野外科学观测研究站 天津 300112; 2. 国家海洋技术中心 天津 300112;
3. 自然资源部珠海海洋中心 珠海 519015)

摘要:潮流能发电装置输出功率是衡量潮流能发电装置经济性能的重要指标。针对潮流能发电装置现场测试期间获取的潮流流速数据有可能难以覆盖测试海域潮流流速的全年变化范围这一科学问题,采用不确定性分析、理论推导、模型验证等方法,分析了潮流流速数据和电功率数据的分布规律,构建了潮流流速数据和电功率数据的分布频率数学模型,提出了潮流能发电装置输出功率预测方法,并应用潮流能发电装置功率特性现场测试期间获取的数据,对提出的输出功率预测方法进行了验证与应用。结果表明:现场测试期间获取的潮流流速数据并不是严格遵守正态分布规律,且潮流流速超过 2.0 m/s 的数据约占统计数据集的 7.0% 左右,但潮流能发电装置的输出功率数据呈现指数函数分布规律,且拟合后的曲线决定系数为 0.99;在流速区间为 2.3 m/s 时,模型预测的输出功率与区间法计算的平均功率之间的差值达到最大,数值约为区间法计算的平均输出功率的 3.5%;建立的两组数据集的最大不确定性约为其输出功率的 2.9%;潮流流速的不确定性传播系数整体上随着潮流流速的增加而呈现出逐渐增大的趋势。研究成果期望为潮流能发电装置整体经济性能评估工作提供参考。

关键词:潮流能;潮流能发电装置;输出功率;现场测试;功率预测

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 the output power prediction method of tidal energy converters based on uncertainty analysis

Xia Hainan^{1,2}, Wang Xiangnan^{1,2}, Guo Yi^{1,2}, Jia Ning^{1,2}, Chen Qiang³

(1. Observation and Research Station of Zhoushan Tidal Energy, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China;
2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 3. Zhuhai Ocean Center,
Ministry of Natural Resources, Zhuhai 519015, China)

Abstract: The output power of a tidal energy converter is an important indicator for measuring its economic performance. The output power characteristics of the tidal energy converter are crucial for calculating the annual energy production of the tidal energy converter. It is also very important for evaluating the overall economic performance of tidal energy converters. In view of this, this article addresses the scientific problem that the tidal current velocity data obtained during the field testing period of tidal energy converters may not cover the annual variation range of tidal current velocity in the field testing sea area. Uncertainty analysis, theoretical derivation, and model verification methods have been used to analyze the distribution patterns of tidal current velocity data and output power data of the tidal energy converter. The output power prediction method has been studied, a mathematical model for the distribution frequency of current velocity data and electric power data has been established, and the field testing data of the power performance characteristics of tidal energy converters have been applied for verification. The results show that the tidal current velocity data obtained during the field testing do not strictly follow the normal distribution law, and the data with current velocities exceeding 2.0 m/s accounts for about 7.0% of the statistical dataset. However, the output power data of the tested tidal energy converter show an exponential function distribution law, and the fitted curve determination coefficient is 0.99; When the tidal current velocity bin is 2.3 m/s, the difference between the predicted

output power by the model and the average power calculated by the bin method reaches its maximum value, which is about 3.5% of the average output power that calculated by the method of bin. The maximum uncertainty of the established two datasets is approximately 2.9% of their output power. The uncertainty propagation coefficient of tidal current velocity generally shows a gradually increasing trend with the increase of tidal current velocity. The research results are expected to provide a reference for the overall economic performance evaluation of tidal energy converters.

Keywords: tidal current energy; tidal energy converter; output power; field testing; power prediction

0 引言

海洋能是绿色、安全、无污染的可再生能源,主要包括潮流能、潮汐能、波浪能、温差能、盐差能等形式^[1]。海洋能储量十分丰富,据联合国科教文组织统计,全世界海洋能理论储量超过 7.66×10^{11} kW,其中潮流能理论可开发量超 6×10^9 kW^[2]。另外,潮流能相对于其他海洋可再生能源而言具有较强的规律性、周期性、可预测性等特点^[3],其开发与利用更是得到了世界各国的普遍重视,世界上很多国家均开展了潮流能发电技术的研发与潮流能发电装置的示范应用工作^[4]。

在潮流能发电装置示范应用工作中,对其输出功率开展现场测试,进而评估潮流能发电装置的年发电量,关乎潮流能发电装置的整体经济性能和社会资本的投资意愿^[5-8]。然而,在现场测试工作中,应用区间法计算潮流能发电装置的年发电量指标时^[9],可能会存在现场测试期间获取的潮流流速数据难以覆盖测试海域潮流流速的全年变化范围这一情况,这不利于准确地评估潮流能发电装置的年发电量指标。因此,急需研究潮流能发电装置输出功率预测方法,以评估潮流能发电装置在不同潮流流速条件下的输出功率,进而科学地评价潮流能发电装置的整体经济性能。

纪合盼^[10]研究了潮流能发电装置额定输出功率的计算方法,但是并没有研究潮流能发电装置在不同潮流流速条件下的实时输出功率预测方法。Evans 等^[6]基于实测数据研究了潮流剖面的垂向差异对潮流能发电装置年发电量指标的影响,但没有量化潮流能发电装置输出功率在不同潮流流速下的数学表达式。杜霜^[11]在 ANSYS 软件中计算了潮流能发电机的额定输出功率指标,并没有基于实测数据对潮流能发电装置输出功率开展研究。此外,风力发电机组与潮流能发电机组有许多相似之处,因此对风力发电机组输出功率的预测方法也进行了分析。风力发电机组输出功率的预测方法主要包括物理模型、机器学习模型、组合模型、统计模型等方法^[12]。物理模型多用于新机组运行前的输出功率预测,并且物理模型涉及到偏微分方程组,导致物理模型的建立与计算较为复杂^[13]。机器学习模型的方法是根据自适应数据学习的方法对输出功率进行预测,但模型的训

练需要大量的现场测试数据^[14]。组合模型是吸纳多个单一模型的优点,进而结合成一个模型对输出功率进行预测,但是组合模型的计算效率存在一定的局限性^[15]。统计模型的方法是通过已有的数据关系对输出功率进行预测^[16],并且相关学者已经成功将该方法应用于风力发电机组输出功率的预测工作中^[17-19]。

然而,目前鲜有在测试数据统计分布结果的基础上,基于不确定性分析的方法对潮流能发电装置输出功率开展预测的研究。鉴于此,在潮流能发电装置现场测试数据不确定性分析的基础上^[20],研究潮流能发电装置输出功率预测方法,并应用现场测试数据验证提出的输出功率预测方法,以期为潮流能发电装置测试与评估工作提供参考。

1 研究方法

潮流能发电装置功率特性现场测试工作中,利用声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)获取测试海域的潮流流速数据,利用电能质量分析仪获取相对应时刻潮流能发电装置输出的功率数据^[21]。设潮流流速数据为输入自变量,表示为 $X \in R_x^{N \times K}$,设潮流能发电装置输出的功率数据为因变量,表示为 $Y \in R_y^{N \times 1}$,其中 N 为样本数量, K 为输入自变量维数。分别采用 Δt 和 $\Delta t'$ 的时间尺度对变量 X 和 Y 分别进行提取,则可以形成式(1)和(2)数据集。

$$\left\{ (R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1}) \right. \\ \left. m = \left[\begin{array}{c} N \\ \Delta t \end{array} \right] \right\} \quad (1)$$

$$\left\{ (R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1}) \right. \\ \left. n = \left[\begin{array}{c} N \\ \Delta t' \end{array} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: m 为第 1 组数据集中的变量个数; n 为第 2 组数据集中的变量个数。

采用潮流流速区间划分算法^[22],对建立的数据集 $(R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1})$ 和 $(R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1})$ 进行处理,分别计算两组数据集中划分的流速区间内数据的不确定性,不确定性的计算如式(3)和(4)所示^[20]。

$$s_k = \frac{\sigma_k}{\sqrt{m_k}} \quad (3)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m_k} (x_j - \bar{x})^2}{m_k - 1}} \quad (4)$$

式中: k 为变量区间序号; s_k 为数据集中变量的不确定性; m_k 为变量个数; σ_k 为数据集中变量标准差; x_j 为数据集中的变量; j 为变量区间内变量序号; \bar{x} 为变量区间内变量均值。

基于伯努利方程和能量守恒定律,潮流流速的输入能量与流速的 3 次方成正比,如式(5)所示。

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: P 为潮流流速的输入能量,单位为 kW; ρ 为测试海域的海水密度,一般取值为 1025 kg/m^3 ; A 为潮流能发电装置的能量捕获截面积,单位为 m^2 ; v 为潮流流速,单位为 m/s 。

由式(5)可知,当被测试的潮流能发电装置确定时,潮流能发电装置输入能量的计算公式就是流速的 3 次方与一个常数的乘积。因此,输出功率模型 M_1 设定为探讨潮流能发电装置的输出功率与潮流流速的 3 次方之间的关系,如式(6)所示。

$$y'_i = av_i^3 \quad (6)$$

式中: y'_i 为模型计算的第 i 个流速区间内的输出功率,单位为 kW; v_i 为第 i 个流速区间内的潮流流速,单位为 m/s ; a 为需要建模确定的计算系数。

此外,考虑到潮流能发电装置的输出功率还与潮流能发电装置的转换效率数据息息相关,而转换效率数据也与潮流流速数据有关。因此,输出功率模型 M_2 设定为探讨潮流能发电装置的输出功率与潮流流速的 b 次方之间的关系,如式(7)所示。

$$y'_i = a'v_i^b \quad (7)$$

式中: a' 为需要建模确定的计算系数; b 为需要建模确定的流速幂次。

进一步地,根据以往潮流能发电装置现场测试数据研究成果^[23],现场测试期间,潮流能发电装置的转换效率数据是随着潮流流速数据的变化而不断变化。因此,输出功率模型 M_3 可设定为探讨潮流能发电装置的输出功率与潮流流速的三次多项式之间的关系,如式(8)所示。

$$y'_i = a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + a_3 v_i^3 \quad (8)$$

式中: a_0, a_1, a_2, a_3 均是需建模确定的系数。

潮流能发电装置输出功率预测模型建立后,采用决定系数、均方根误差和平均绝对误差进行模型预测效果的对比分析。决定系数、均方根误差和平均绝对误差的计算如式(9)~(11)所示。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_t} (y'_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{m_t} (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m_t} \sum_{i=1}^{m_t} (y_i - y'_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{m_t} \sum_{i=1}^{m_t} |y_i - y'_i| \quad (11)$$

式中: R^2 为模型的决定系数; $RMSE$ 为均方根误差; MAE 为平均绝对误差; \bar{y}_i 为第 i 个流速区间内实测功率数据的均值,单位为 kW; m_t 为流速区间的个数; y_i 为第 i 个流速区间内实测功率数据,单位为 kW。

2 案例应用

2.1 案例应用海域及应用对象

本研究的应用案例位于浙江省舟山市葫芦岛海域,该海域海底地形复杂且为基岩底质,水深变化较为剧烈,最大实测水深约为 82.70 m,最高潮位 2.49 m,最低潮位 -1.68 m,实测最大潮差为 4.15 m,最小潮差 0.55 m,平均潮差为 2.49 m,该海域的潮流为明显的往复流,落潮历时大于涨潮历时^[24]。测试应用对象额定功率为 450 kW,变流器额定功率 1 000 kW,额定输出电压 690 V,涡轮机的叶轮扫掠直径为 18.5 m。

2.2 测试数据获取

在案例应用海域,对潮流能发电装置开展了 40 余天的功率特性现场测试工作。现场测试期间,应用美国 Rowe Technologies 公司生产的声学频率为 600 kHz 声学多普勒流速剖面仪获取潮流能发电装置能量捕获截面范围内的潮流流速值,潮流数据的平均间隔为 5 min,ADCP 的测量剖面示意图如图 1 所示。图 1 中 h 表示等效直径, Δs 表示测量层厚,ADCP 布放位置距涡轮机的叶轮中心点为 2~5 倍等效直径。ADCP 位于海底也避免了波浪的影响。

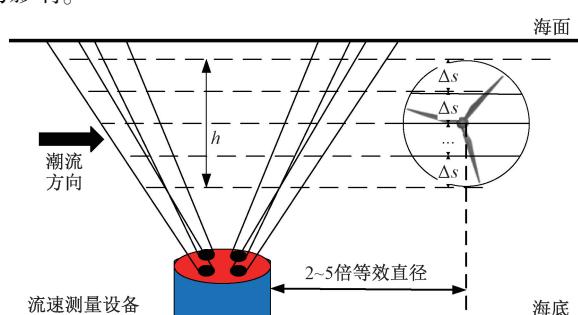


图 1 ADCP 测量剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ADCP measurement profile

应用美国 Fluke 公司生产的 F1777 型电能质量分析仪获取潮流能发电装置输出的功率数值,电功率数据的采样频率为 1 Hz,每间隔为 1 min 对获取的电功率数据进行平均,即计算潮流能发电装置在 1 min 内的平均输

出功率数据。对测试海域的潮流流速和潮流能发电装置的输出功率开展现场测试前,首先同步两种测量设备时钟,以确保采集的潮流数据与电力数据之间时间轴的一致性。现场测试期间,ADCP的采样频率为1 Hz,测量层厚度为1 m,在整个剖面范围内共采样40层。电能质量分析仪的数据采样频率为1 Hz,电力测量数据采用实时传输的方式存储在上位机中。

2.3 测试数据预处理与质量控制

获取案例应用海域的潮流流速数据和潮流能发电装置输出功率数据后,首先依据现场测试数据的时间轴,将潮流流速数据和功率数据相互对应。其次,将潮流能发电装置未发电时刻的功率数据和与其相对应的潮流流速数据剔除。最后,由于测量过程中的偶然误差和测量数据漂移等因素,测试数据集中可能会存在一定量的异常数据。因此,在以往研究成果的基础上,采用四分位法对测试数据中的异常数据进行识别与剔除^[25]。

3 结果与分析

3.1 测试数据分析

为了分析测试数据的分布情况,分别绘制了潮流流速数据和输出功率数据的频率分布图以及输出功率散点图,结果如图2~4所示。

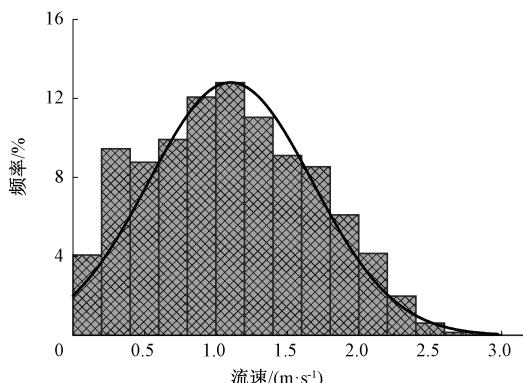


图2 潮流流速数据的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of tidal current velocity

通过对图2的分析可知,现场测试期间获取的测试海域潮流流速最大值约为2.8 m/s,潮流流速在1.0~1.2 m/s范围内的出现频率最高,分布频率的数值约为13.0%。此后,随着潮流流速的增大,潮流流速的分布频率呈现降低的趋势。尤其是当潮流流速超过2.0 m/s时,流速的分布频率降低较为显著,这表明该海域潮流流速超过2.0 m/s的数据总量不多,约占统计数据集的7.0%左右。另外,图2中的曲线为标准正态分布曲线,由曲线和柱状图之间的关系可知,现场测试期间获取的

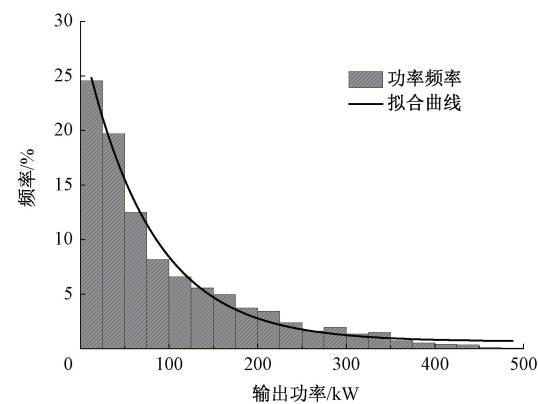


图3 功率数据的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of output power

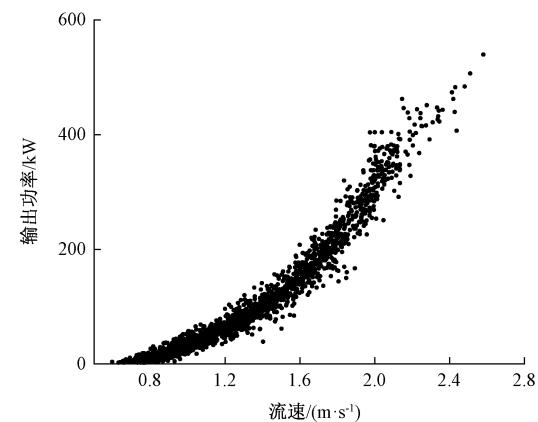


图4 输出功率散点图

Fig. 4 Output power scatter

潮流流速数据并不是严格遵守正态分布规律,这可为后续开展潮流流速异常数据的识别与分析提供参考。

对图3分析可知,潮流能发电装置在现场测试期间约有65.0%的输出功率数据<100 kW,超过400 kW的输出功率数据约占测试期间数据总量的1.0%左右,这表明现场测试期间输出功率超过100 kW的数据量不足一半,超过400 kW的数据量更是较少,这可为今后同类型潮流能发电装置逆变器等电气设备的选型提供参考。另外,通过图3的数据拟合曲线可知,测试期间潮流能发电装置输出功率数据的分布频率基本呈现指数函数的分布规律。拟合曲线表达式为: $y = 28.4 \times e^{-x/77.1} + 0.65$,拟合曲线的决定系数为0.99,表明该数学表达式能够很好地表征输出功率数据的分布频率。

通过对图4的分析可知,在现场测试期间获取的潮流能发电装置的最大输出功率约为540 kW。当测试海域潮流流速约为0.6 m/s时,潮流能发电装置开始发电,即潮流能发电装置的切入流速约为0.6 m/s。另外,图4中输出功率数据点的分布情况,也印证了图3中对潮流

能发电装置输出功率数据频率分布的分析结果,即潮流能发电装置输出功率超过 400 kW 的数据量不多。值得说明的是:该测试分析结果仅仅是测试期间获取的测试数据的情况,如果潮流能发电装置在测试后的运行策略、控制策略等发生变化,则其功率特性曲线会有不同的表现。这同样为潮流能发电装置功率特性现场测试工作提供参考,即在潮流能发电装置功率特性现场测试期间,不应改变潮流能发电装置运行策略。

3.2 不确定性分析

本文构建的两组数据集的时间尺度是 39 天。为了分析数据集 $(R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1})$ 和 $(R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1})$ 的不确定性,依据本文提出的不确定性计算方法,分别绘制了两组数据集中功率数据不确定性曲线和相对误差曲线,如图 5 和 6 所示。

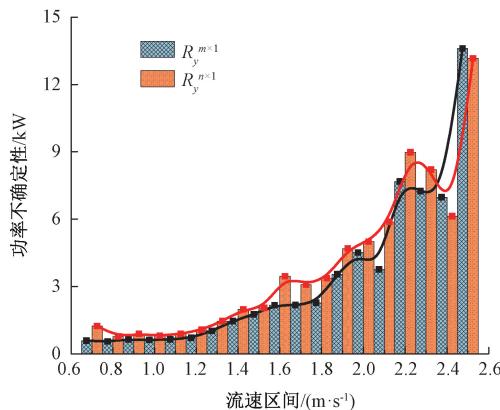


图 5 输出功率不确定性对比

Fig. 5 Comparison of output power uncertainty

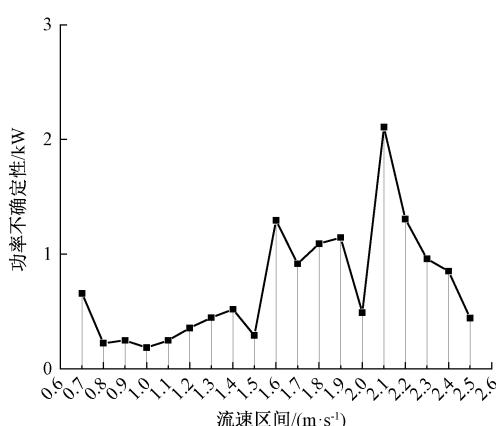


图 6 不确定性的相对误差曲线

Fig. 6 Relative error curve of output power uncertainty

通过对图 5 的分析可知,两组数据集不确定性曲线的走势基本一致,在流速区间为 2.2 m/s 时,两组数据集的不确定性表现出的差异性相对其他流速区间而言较为

明显。通过对图 6 的分析可知,现场测试期间,两组数据集中潮流能发电装置输出功率数据不确定性的相对误差随着潮流流速的增加表现出先增大后减小的趋势。在流速区间为 2.5 m/s 时,两组数据集的不确定性数值达到最大,数值约为 13.2 kW,对此流速区间内潮流能发电装置输出功率数据进行溯源分析发现,此流速区间内潮流能发电装置的平均输出功率约为 452.9 kW,即两组数据集的最大不确定性约为其输出功率的 2.9%。由此可分析出,两组数据集 $(R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1})$ 和 $(R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1})$ 之间并没有显著的差异性。

3.3 输出功率预测模型

根据本文提出 3 种输出功率预测模型,利用数据集 $(R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1})$ 确定 3 种输出功率预测模型的计算系数,结果如表 1 所示。

表 1 模型的数学表达式

Table 1 Mathematical expression of the model

| 模型 | 数学表达式 |
|-------|--|
| M_1 | $y'_i = 34.60v_i^3$ |
| M_2 | $y'_i = 45.30v_i^{2.667}$ |
| M_3 | $y'_i = 140.33 - 395.37v_i + 323.22v_i^2 - 42.51v_i^3$ |

依据决定系数计算方法,计算出 3 种数学模型的决定系数分别为 0.986、0.992、0.998,这表明 3 种数学模型的均能够较好地表征潮流流速与输出功率之间的数学关系。为了进一步地研究数学模型预测效果,应用 $(R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1})$ 数据集绘制了 3 种模型预测效果对比分析图,结果如图 7 所示。

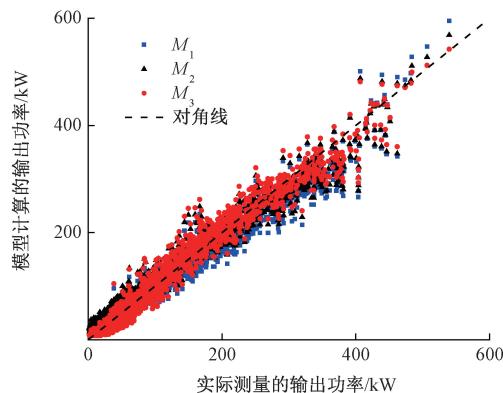


图 7 输出功率模型预测效果对比

Fig. 7 Comparison of output power model results

图 7 中,横坐标表示数据集 $(R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1})$ 中实际测量的输出功率,纵坐标表示表示模型计算的潮流能发电装置输出功率,黑色虚线表示对角线。通过对图 7 的分析可知, M_3 输出功率预测模型的计算结果相对于其他的两

个输出功率预测模型而言,其计算结果主要集中在黑色虚线的两侧,这表明该输出功率模型计算结果与数据集中的实测结果较为吻合。由此可以定性地推断出,当与另外两个输出功率模型进行比较时, M_3 模型为预测被测试潮流能发电装置的输出功率指标时提供了相对准确的计算结果。进一步地,为了定量的分析 3 种数学模型的预测效果,分别计算了 3 种输出功率预测模型的均方根误差和平均绝对误差,计算结果表 2 所示。

表 2 模型预测效果对比

Table 2 Comparison of model performance parameters

| 模型 | RMSE | (kW) |
|-------|------|------|
| M_1 | 23.1 | 14.9 |
| M_2 | 22.8 | 17.2 |
| M_3 | 19.7 | 12.9 |

由表 2 可知, M_3 模型的均方根误差和平均绝对误差最小,这也能够表明其对潮流能发电装置输出功率的预测效果相对于另外两组模型而言较好。因此,该模型可以应用于案例应用的潮流能发电装置输出功率的预测中。

3.4 功率特性曲线对比分析

根据 M_3 模型能够绘制出潮流能发电装置的功率特性曲线,为了研究其与传统区间法所绘制的功率特性曲线之间的差异性,绘制了潮流能发电装置输出功率特性曲线对比分析图,结果如图 8 所示。另外,为了研究 M_3 模型和其他两个模型所绘制的功率特性曲线的差异性,绘制了应用 3 个模型预测的输出功率曲线对比图,结果如图 9 所示。

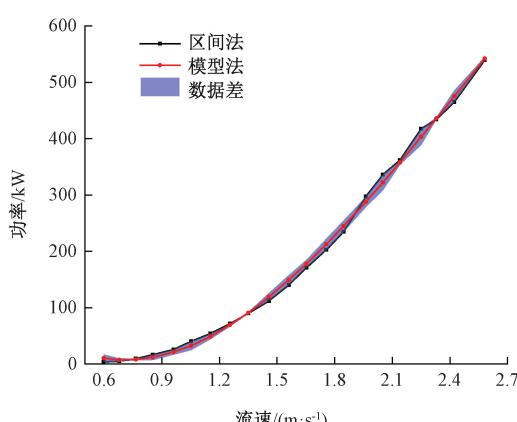


图 8 功率特性曲线对比

Fig. 8 Comparison plot of output power curve

从定性的角度对图 8 进行分析可知,应用模型法和区间法绘制的两条潮流能发电装置输出功率曲线之间的

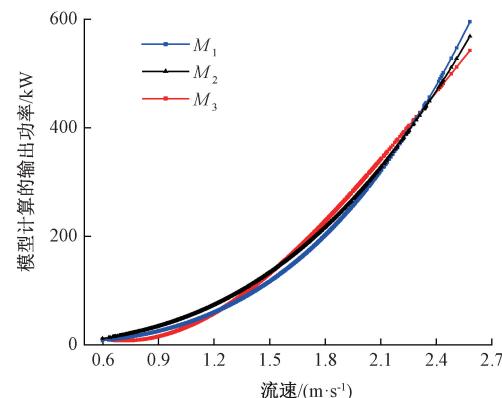


图 9 模型预测的功率特性曲线对比

Fig. 9 Comparison plot of output power curve predicted by the models

差异并不显著。而从定量的角度分析可知,在流速区间为 2.3 m/s 时,两种方法绘制的输出功率曲线之间的差值达到了最大,其数值约为 14.5 kW,而流速区间为 2.3 m/s 时应用区间法计算得到的潮流能发电装置输出功率约为 417.8 kW。即两条曲线之间的最大差值约为其平均输出功率的 3.5%。由此表明两种方法绘制的输出功率曲线均能够较好地表征潮流能发电装置在不同潮流流速条件下的输出功率特性,但是应用 M_3 模型绘制的输出功率曲线相对于应用区间法绘制的输出功率曲线而言更加平滑。由此可以推断出,应用模型法绘制的功率特性曲线能够滤除传统区间法绘制的功率曲线的波动性,这也为潮流能发电装置输出功率曲线的绘制提供了一种新方法。

通过对图 9 的分析可知,当潮流流速 ≤ 2.4 m/s 时,应用 3 种输出功率预测模型绘制的输出功率曲线之间的差异并不显著。当潮流流速超过 2.4 m/s 时,所绘制的 3 条输出功率曲线之间具有较为明显的差异性。即, M_1 模型预测的输出功率最大,而 M_3 模型预测的输出功率最小。另外,通过图 8 的分析已知 M_3 模型预测的输出功率与实测结果相符较好。因此,图 9 可以更加直观地表明 M_3 模型对输出功率的预测结果相对于另外两个模型更为准确。

3.5 输入变量的不确定性传播机制分析

在本文建立的潮流能发电装置输出功率预测模型中,潮流流速是该模型的输入变量。在对不确定性传播机制进行研究与分析的基础上^[26-28],计算了数据集($R_x^{m \times K}, R_y^{m \times 1}$)和($R_x^{n \times K}, R_y^{n \times 1}$)中潮流流速的不确定性传播系数^[20],绘制了两组数据集中的潮流流速数据在每个流速区间内的不确定性传播系数对比图,结果如图 10 所示。

通过对图 10 的分析可知,当潮流流速 ≤ 2 m/s 时,两组数据集中潮流流速的不确定性传播系数整体上随着潮

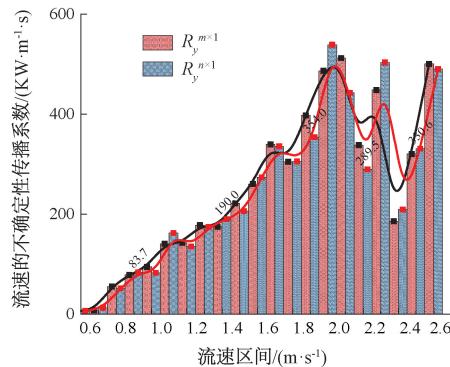


图 10 输入变量的不确定性传播系数对比

Fig. 10 Comparison plot of uncertainty propagation coefficient

流流速的增加而呈现出逐渐增大的趋势，并且两组数据集中潮流流速的不确定性传播系数之间并有显著差异。当潮流流速超过 2 m/s 时，两组数据集中潮流流速的不确定性传播系数均出现了一定的波动性。出现该波动性的原因可结合图 2 进行分析。由图 2 可知，当潮流流速超过 2 m/s 时，潮流流速数据在所划分的流速区间内的最大分布频率约为 4%，并且随着潮流流速的增加，潮流流速数据的分布频率呈现出显著的下降趋势。由此可以推断出，当现场测试期间获取的数据总量一定时，随着潮流流速数据在超过 2 m/s 的流区间内的分布频率逐渐降低，导致了潮流流速超过 2 m/s 的数据总量较少，这可能是图 10 中潮流流速超过 2 m/s 时潮流流速的不确定性传播系数出现波动的原因之一。然而，在本文的研究工作中已将现场测试期间获取的全部数据应用于潮流流速不确定性传播系数的计算、潮流能发电装置输出功率模型验证等工作中。鉴于此，在今后潮流能发电装置现场测试和输出功率预测工作中，为了提高所建立的潮流能发电装置输出功率预测模型的鲁棒性，一方面可以增加现场测试的时间长度，另一方面可以提高现场测量设备的采样频率。

4 结 论

潮流能发电装置的输出功率指标对于计算潮流能发电装置的年发电量指标、评估潮流能发电装置的整体经济性能等指标都至关重要。鉴于此，针对潮流能发电装置现场测试期间获取的潮流流速数据有可能难以覆盖测试海域潮流流速的全年变化范围这一科学问题，在理论分析的基础上，提出了潮流能发电装置输出功率预测方法，并应用潮流能发电装置功率特性现场测试数据，结合现场测试数据集不确定性分析结果，对建立的潮流能发电装置输出功率预测模型进行了对比分析，可得出的结论为：

1) 测试期间获取的潮流流速数据并不是严格遵守正态分布的规律，且潮流流速超过 2.0 m/s 的数据约占统计数据集的 7.0% 左右。该分析结果能够为今后潮流流速异常数据的识别与剔除提供参考。

2) 测试期间潮流能发电装置的输出功率数据呈现指数函数的分布规律，且拟合曲线的决定系数为 0.99。该分析结果可为今后潮流能发电装置整流器、逆变器等电气设备的选型提供有益借鉴。

3) 两组数据集的最大不确定性约为其输出功率的 2.9%，表明建立的两组分析数据集之间并没有显著的差异性，该分析结果为今后潮流能发电装置功率特性的现场测试工作提供了参考。

4) 模型 M_3 的均方根误差和平均绝对误差分别为 19.7 和 12.9，该结果相对于另外两个数学模型而言，能够更好地预测潮流能发电装置输出功率数值。另外，应用模型 M_3 绘制的功率特性曲线能够滤除传统区间法绘制的功率曲线的波动性。

5) 在今后潮流能发电装置功率特性现场测试和潮流能发电装置输出功率预测工作中，为了提高所建立的输出功率预测模型的鲁棒性，可以提高现场测试数据的获取能力。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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: 119079.
- [4] The Executive Committee of International Energy Agency Ocean Energy Systems. An overview of ocean energy activities in 2023 [R]. 2024.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(8): 668-674.
- [8] LEWIS M, MCNAUGHTON J, MÁRQUEZ-DOMÍNGUEZ C, et al. Power variability of tidal-stream energy and implications for electricity supply [J]. Energy, 2019, 183: 1061-1074.
- [9] 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.
- [10] 纪合盼.基于实测数据的潮流能发电场规划方法研究 [D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- JI H P. Research on the method of planning for tidal farm based on measured data [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [11] 杜霜.一套小功率潮流能发电系统的设计与研究 [D]. 曲阜:曲阜师范大学,2020.
- DU SH. Design and research of a small tide energy converter [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2020.
- [12] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等.风电网功率预测物理方法研究 [J].中国电机工程学报,2010,30(2):1-6.
- FENG SH L, WANG W SH, LIU CH, et al. Study on the physical approach to wind power prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(2): 1-6.
- [13] 晋孟雪.基于改进VMD和深度学习的风电功率预测研究 [D]. 西安:西安理工大学,2023.
- JIN M X. Research on wind power predication based on improved VMD and deep learning [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [14] MEENAL R, BINU D, RAMYA K C, et al. Weather forecasting for renewable energy system: A review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29: 2875-2891.
- [15] 姜雯曦.基于组合模型的风电功率超短期和短期预测研究 [D]. 西安:西安理工大学,2021.
- JIANG W X. Research on ultra-short-team wind power and short-team wind power prediction based on combined model [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [16] 武煜昊,王永生,徐昊,等.风电输出功率预测技术研究综述 [J].计算机科学与探索,2022,16(12):2653-2677.
- WU Y H, WANG Y SH, XU H, et al. Survey of wind power output power forecasting technology [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2022, 16(12): 2653-2677.
- [17] 王贺.风电短期功率预测与并网多目标调度优化研究 [D]. 武汉:武汉大学,2014.
- WANG H. Study of short-term prediction and multi-objective optimal dispatching of grid-connected wind power [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [18] 张家安,黄晨旭,李志军.考虑局部条件特征的风电功率短期预测 [J].太阳能学报,2024,45(12):220-227.
- ZHANG J AN, HUANG CH X, LI ZH J. Short term prediction of wind power considering local condition features [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(12): 220-227.
- [19] 时帅,张皓,黄冬梅,等.考虑爬坡特征量的海上风电短期分区功率预测 [J].太阳能学报,2024,45(12):258-268.
- SHI SH, ZHANG H, HUANG D M, et al. Short term zoning power prediction of offshore wind power considering climbing feature quantities [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(12): 258-268.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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 Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(3) : 95-100.
- [23] 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 Science Instrument, 2018, 39(7) : 226-234.
- [24] 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.
- [25] 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 Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(8) : 472-476.
- [26] 温秀兰, 宋爱国, 冯月贵, 等. 基于最优位姿集的机器人标定及不确定度评定 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9) : 276-283.
WEN X L, SONG AI G, FENG Y G, et al. Robot calibration and uncertainty evaluation based on optimal pose set [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9) : 276-283.
- [27] 江文松, 李旋, 罗哉, 等. 六自由度机械臂参数校准不确定度评定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7) : 26-34.
JIANG W S, LI X, LUO Z, et al. Uncertainty evaluation of calibration model of six DOF robot arm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7) : 26-34.
- [28] 魏明. 皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6) : 146-154.
WEI M M. Deviation correction of GUM evaluation uncertainty in the wind speed measurement by pitot tube [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6) : 146-154.

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. and M. Sc. degrees from Dalian Ocean University in 2012 and 2015, respectively. He is currently a senior engineer at National Ocean Technology Center. His main research interests include field testing and assessment technology for ocean energy converters.



陈强, 2003 年于中国海洋大学获得学士学位, 2009 年于中国海洋大学获得硕士学位, 现为自然资源部珠海海洋中心高级工程师, 主要研究方向为海洋观测预报、海洋防灾减灾。

E-mail: zhhyyb@163.com

Chen Qiang received his B. Sc. and M. Sc. degrees from China Ocean University in 2003 and 2009, respectively. He is currently a senior engineer at Zhuhai Ocean Center, Ministry of Natural Resources. His main research interests include ocean observation and forecasting, ocean disaster prevention and mitigation.