用于预测水平轴潮汐涡轮机性能的数值软件比较

Robert Ellis、Joshua Bowman、Matthew Allmark、Shanti Bhushan、David Thompson、Allan Mason-Jones、Tim O’Doherty

摘要——**为了使潮汐能成为化石燃料的替代能源，人们需要对水平轴潮汐涡轮机装置预测性能的可靠性充满信心。目前已有多种计算流体动力学软件包，可用于辅助新装置的设计与测试。本文开展了一项比较研究，作为范围界定工作，对比了两个广泛使用的软件包：OpenFOAM 和 ANSYS CFX。**

数值模拟在两种软件中均采用相同的几何结构、网格和湍流模型进行。所得结果与在 INSEAN 开展的实验测试结果进行了比较。文中详细介绍了每个模型的设置。研究发现，模型的运行和设置过程存在差异，结果的时间历程也存在差异。

总体而言，与实验测试相比，CFX 和 OpenFOAM 对性能系数都给出了良好的预测；在对多个完整旋转周期的数据进行平均后，两者的预测结果彼此之间也具有良好的一致性。

索引词—**ANSYS CFX、计算流体动力学、海洋能源、OpenFOAM、潮流涡轮机**

I. 引言

随着全球社会，尤其是英国，寻求摆脱对有限化石燃料的燃烧依赖，海洋能源开发作为一种可能的替代能源资源，日益受到关注。这在一定程度上是因为波浪能和潮汐能开发有望助力实现英国力争在 2020 [1] 年达到的 20 % 可再生能源目标。据估计，英国每年可提供多达 50 TW h 的能源，占欧洲海洋能源潜力的 48 % [2]。英国沿海地区已有少数项目开始展现海洋能源开发的潜力，但这些项目成本高昂且耗时较长。

为帮助缓解这一成本和时间因素，目前及过去一直在罗马的意大利国家船舶建筑研究与试验院水槽（INSEAN）拖曳水池、法国海洋开发研究院（IFREMER）水槽等设施开展大量小比例试验 [3]–[9]。小比例试验为计算模型提供了验证和比较的平台，从而能够研究潮流涡轮机在各种流动条件下的性能。

与实验测试相比，使用计算流体力学（CFD）可以快速、低成本地初步估算水平轴潮汐涡轮机的性能。鉴于计算流体力学模型的复杂性，目前已有许多不同的计算流体力学代码和软件包，每种都能让用户对相关仿真进行独特的控制。代码种类如此繁多，因此，如果能在不同平台上复现结果，将有助于提高人们对计算流体力学模型的信心，尤其是在进行潮流涡轮机的初步预测时。

先前研究表明，计算流体力学可用于进行准确预测，尤其是在考察潮汐涡轮机的性能时。Tatum 等人 [10], [11] 使用 CFX 研究了波流相互作用和剖面流对涡轮机性能与载荷的影响。Frost 等人 [9] 基于先前验证过的计算流体力学模型，研究了流向性对装置性能的影响；而 Mason-Jones 等人 [12] 则使用 Fluent 考察了在速度剖面作用下，支撑结构对涡轮机性能的影响。

Dai 和 Lam [13] 使用 ANSYS CFX，采用 SST k-ω 湍流模型进行瞬态仿真，以预测垂直轴海流能水轮机的性能。他们发现，所得数值结果与实验结果吻合良好。

McSherry 等人 [14] 使用 CFX 研究了涡轮机的性能，并将其与 [15], [16]开展的实验测试进行了比较。结果发现，预测结果取决于近壁区域和远场区域中的节点数量。总体而言，数值模型的推力和功率捕获结果与实验结果吻合良好。

Stringer 等人 [17] 比较了 CFX 13.0 和 OpenFOAM 1.7.1 在不同雷诺数条件下绕圆柱体的几种流动情况。研究得出结论：在较低雷诺数下，两种数值求解器的计算结果均与实验结果吻合良好。然而，随着雷诺数增大，CFX 和 OpenFOAM 的计算结果似乎不仅与测量结果出现偏差，而且彼此之间也存在偏差。

本文投稿至潮汐水动力学建模专题，编号 1341。作者感谢英国海洋能源超级创世纪中心（EPSRC：EP/N020782/1）和 MaRINET II 跨国访问计划的支持。R. Ellis、M. Allmark、A. Mason-Jones 和 T. O’Doherty 任职于卡迪夫大学，地址为英国卡迪夫 CF24 3AA，The Parade 14-17，Queens Building（电子邮件：EllisR10@cardiff.ac.uk）。J. Bowman、S. Bhushan 和 D. Thompson 任职于美国密西西比州立大学，地址为密西西比州立大学，MS 39762（电子邮件：jb1060@msstate.edu）。

Robertson 等人 [18] 针对 OpenFOAM 2.0.0 开展了一项验证与确认研究。该研究考察了对后向台阶、球体和三角翼周围不可压缩流的求解，以确定 OpenFOAM 作为数值方法的精度，并使用了两种不同的求解器：*pimpleFoam* 和*simpleFoam*。研究结果与商业软件 Fluent、文献中可用的计算流体力学数据以及可获取的实验数据进行了比较。研究发现，在测试的模拟范围内，OpenFOAM 得出的结果具有足够的精度。

本文旨在选取两种广泛使用的计算流体力学软件包——ANSYS CFX 和 OpenFOAM，并比较它们作为范围评估方法用于预测潮流涡轮机性能时的表现。CFX 和 OpenFOAM 均采用有限体积法（FVM）对流体控制方程（即纳维－斯托克斯方程，NS 方程）进行离散化，也都能够使用后文 II-D 节所述的同一种湍流模型。实验工作用于对装置进行初步验证和整体比较；然而，本文关注的是不同软件预测结果之间的差异。

II. 数值方法

本研究采用了两种数值方法：商业计算流体力学代码 ANSYS CFX，以及基于 C++ 的开源计算流体力学工具箱 OpenFOAM。这两种方案各有优缺点。商业代码为用户提供大量支持，并配备非常稳定的求解器。然而，由于软件采用封闭式设计，用户能够修改基本控制方程的空间有限。另一方面，OpenFOAM 拥有 80 多个求解器模块，可根据仿真需求选用，此外还提供 170 多种网格生成工具 [18]。在 OpenFOAM 中，代码的每个部分都可以自由定制，因此能够对种类繁多的问题进行建模；不过，它采用基于文本的配置方式，而非图形用户界面。

以下部分概述了使用 ANSYS‘ 进行的几何形状建模和网格划分流程。随后将分别介绍 CFX 和 OpenFOAM 的问题设置，并简要概述所使用的湍流模型。

A. 几何形状

该模型的设置旨在复现实验测试，相关详细信息可参见 III。我们使用内置的 ANSYS CAD 编辑器 Design Modeller 创建了用于模拟的几何形状。

创建了一个矩形计算域，以模拟具有相同横截面尺寸的拖曳水池。为减少单元数量，缩短了计算域的长度。其几何形状和尺寸如图1所示。在计算流体力学（CFD）部分的语境中，该矩形计算域被称为水槽。

创建了第二个圆柱形计算域，以包围涡轮机转子和轮毂。该计算域用于在仿真过程中通过

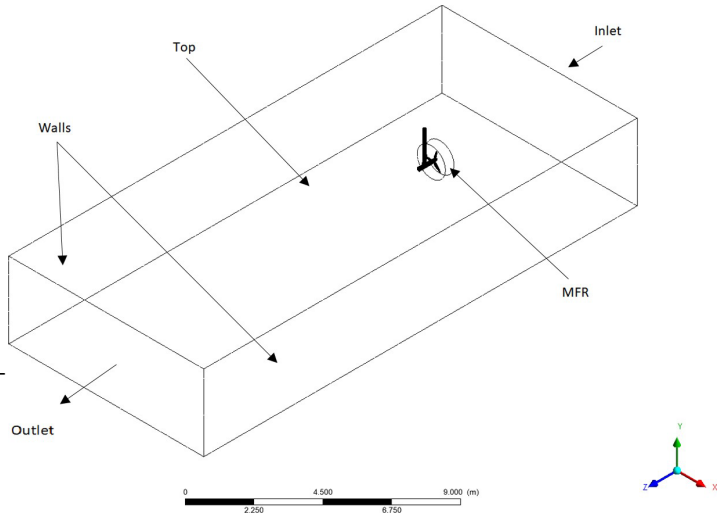

图 1. 用于仿真的完整几何形状，尺寸分别为 x、y 和 z 方向上的 9 m x 4.5 m x 20 m。

运动参考系（MFR）实现涡轮机的旋转。为避免边界效应，MFR 的直径设置得大于转子直径，其设计基于 Ellis 等人 [19] 的研究。两个区域彼此独立，因此可以更轻松地创建仿真中的静止部分和旋转部分。

CFX 和 OpenFOAM 在模拟过程中都将所有体积视为流体，因此从两个区域中减去涡轮机几何结构，以创建用于流动相互作用的空腔。几何形状如图 2 所示。网纹区域表示水槽和多参考系区域。可以看到涡轮机，但它没有网纹。

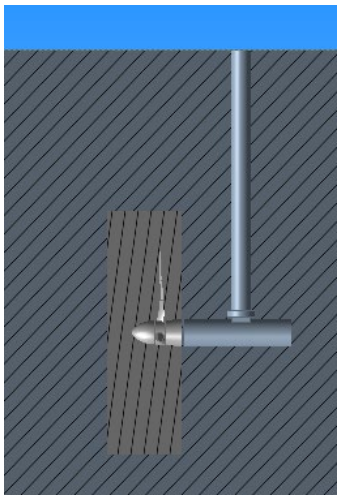

图 2. 展示多参考系和水槽内涡轮机的计算流体力学几何结构。

B. 网格划分

流体体积被划分为网格，由若干单元或元素组成。这些元素的尺寸和密度会影响整体解的精度以及达到收敛解所需的时间。

不稳定流动区域中的单元数量越多，结果就越精确，但仿真所需的时间也越长。

网格使用 ANSYS 内置的网格划分软件生成，随后导出为适用于 OpenFOAM 的格式。为便于比较，CFX 和 OpenFOAM 使用了相同的网格。值得注意的是，本次对比研究仅创建了一个网格，即使用 ANSYS 生成的网格。Ellis 等人使用相同的几何形状进行了网格收敛研究，该研究被用作本研究网格的依据。表 I 概述了模型中各面的网格尺寸设置。OpenFOAM 未单独进行网格收敛研究。

与水槽的其余部分相比，多参考系区域具有旋转流动和复杂几何形状，因此被赋予了更高的优先级。叶片上的网格尺寸通过面尺寸控制，从叶根到叶尖逐渐减小。为降低旋转过程中单元翻转而产生负体积的可能性，多参考系区域的最大单元尺寸保持较小。

为帮助保留相关项，水槽与多参考系区域之间的界面采用了相近的面尺寸。建议界面两侧的网格尺寸比最大为 3:1，但本例采用了 1:1 的尺寸比，以确保界面处不会出现问题。

在支柱与转子后部之间设置了一个局部加密区域。由于支柱的阻塞效应，转子后部与...之间存在低流速区域。支柱。流经支柱时，较慢的流动会附着在叶片吸力面上，最终影响涡轮机的性能 [9]。通过细化该区域的网格，可以更清楚地观察支柱对流动的影响。涡轮机周围的网格见图3。

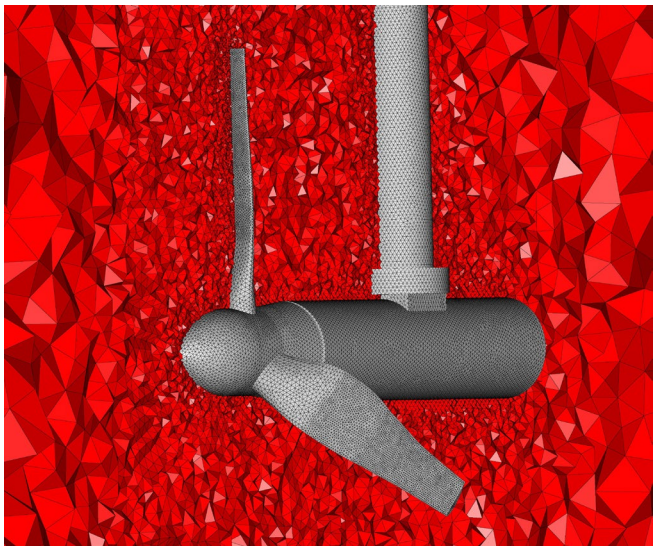

图3. 涡轮机周围的网格。

网格总共由 3.6 百万元素组成。其中 1.2 百万元素位于 MFR区域。本研究并不关注尾流，因此该区域涡轮机下游的网格划分基本上没有进行细化。最终的面尺寸见表 I。全局增长率保持为 1.2。在本例中，TSR 为 4 时，CFX 和 OF 的$y+$ 均为≈ 90 。对于$y+$ > 11 ，ANSYS CFX 会自动从近壁面处理方法切换为壁面函数处理方法，从而使 y+ 值具有更大的可接受范围。尽管近壁面间距较大，但 Menter 等人[20] 在研究 SST k-ω 湍流模型时发现，当 2 < $y+$ < 100 时，结果仅相差 2%。

表 I 网格面尺寸

域	边界	最大面尺寸 [m]
水槽	入口	0.18
	出口	0.18
	支柱	0.18
	Top	0.18
	壁面	0.18
涡轮机	叶尖	0.003
	叶片中部	0.0045
	叶根	0.006
	Hub	0.006
界面	外部（水槽）	0.02
	内部（多参考系）	0.02

C. 边界条件和设置

1) CFX： CFX模型的边界条件通过 CFX-Pre 设置，详见表II。

表II CFX 模型设置

域	边界	Type	详细信息
水槽	入口	入口	1 [米/秒]
	出口	出口	压力 0 [Pa]
	支柱	Wall	无滑移
	Top	开口	卷吸 0 [Pa]
	壁面	Wall	无滑移
涡轮机	叶片	Wall	无滑移
	Hub	Wall	无滑移

为了加快仿真，首先使用冻结转子方法求得稳态解。冻结转子方法将涡轮机固定在原位，同时使流动以给定尖速比（TSR）所对应的目标角速度绕转子旋转。最终得到力和扭矩的单一稳态结果。随后将该解用作非稳态模拟的初始条件文件。这样一来，求解器便已知稳定流动区域，因此模型能以更少的计算时间收敛。在非稳态模拟过程中，多参考系（MFR）通过滑动网格方法随时间旋转。网格在每个时间步都会移动，并在旋转的每个位置计算力和扭矩。每个时间步都力求在 10 次系数循环内达到收敛。

非稳态模拟所用的时间步为 0.003 s，该值根据叶片尖端处采用的最小单元尺寸 0.003 m 和 1 m s^{-1} 的入口速度确定。ANSYS 还建议，

每个时间步的旋转角度应小于 5°。在时间步为 0.003 s 时，最高尖速比下的最大旋转角度小于 2.5°。本研究未进行完整的时间步收敛性研究。

收敛残差目标在求解器控制中设定。残差用于检验解对雷诺平均纳维-斯托克斯方程的满足程度。CFX 使用归一化残差来判断模型是否收敛。求解器判断模型是否收敛时不会使用湍流输运方程，只使用质量和动量方程。

确定收敛性的第二种方法，是查看模型时间序列中叶片上的扭矩和力的数值。使用以下表达式监测表面：变量_z()@边界名称，以追踪作用于指定边界、沿给定坐标方向的特定变量。不过，这种方法不能替代残差；但它可以按时间步监测特定变量，从而指示收敛情况。

研究考察了十二个角速度，其数值见表 III。所示数值取自实验结果。通过嵌套的 *if* 语句，根据时间改变角速度。每隔 30 s，速度便增加到下一个指定值。之所以选择 30 s，是因为研究发现，模型在约 5 s 后即可达到收敛，因此至少有 20 s 的收敛数据可用于结果分析。在使用 *if* 语句时，角速度仅以小幅增量增加；因此，鉴于仿真使用前一个结果来初始化下一个尖速比，其达到收敛的速度比从 t = 0开始分别运行十二个独立模型更快。

表 III：CFD 模型使用的叶尖速比值

TSR	角速度 [rad/s]
1 414 .1.508	3.14 3.35
1.790	3.98
1.979	4.40
2.497	5.55
3.015	6.70
3.486	7.75
4.004	8.90
4.476	9.95
4.947	10.99
5.511	12.25

CFX模型采用高分辨率对流格式求解质量和动量方程的 RANS方程。系统会在一阶和二阶差分格式之间自动切换，因此用户无需输入任何设置。由于该模型复现的是在拖曳水池中进行的测试，湍流强度设得较低。湍流模型还有一种高分辨率选项，其不过，在本例中使用了一阶差分格式。

所有 CFX 模拟均在卡迪夫大学的 Hawk 集群上运行，该集群属于威尔士南部超级计算设施的一部分。Hawk 集群共有 201 个节点，总计 8040 个核心。每个节点配备两颗 20 核的 Intel Xeon Gold 6148 处理器和 192 GB 内存。模拟使用单个节点上的 40 个核心执行。

2) OpenFOAM: OpenFOAM 中设置的边界条件如表 IV 所示。动能 k 和比湍流耗散率 ω 均采用壁面函数。

表 IV：OpenFOAM 模型设置

场	边界	条件	详细信息
U	入口	固定值	(0,0,1) [米/秒]
	出口	入口出口	0 [米/秒]
	Top	slip	
	壁面	无滑移	0 [米/秒]
	支柱	无滑移	0 [m/s]
	叶片/轮毂	运动壁面速度	0 [m/s]
P	入口	零梯度	
	出口	固定值	0 [米²/秒²]
	Top	slip	
	壁面	零梯度	
	支柱	零梯度	
	叶片/轮毂	零梯度	
k	入口	固定值	1.5e-4 [米²/秒²]
	出口	入口出口	1.5e-4 [m²/s²]
	Top	slip	
	壁面	kqR壁面函数 1.5e-4	[m²/s²]
	支柱 kqR壁面函数 1.5e-4	[m²/s²]	
	叶片/轮毂 kqR壁面函数 1.5e-4 [m²/s²]		
ω	入口 固定值 0.0816 [/s]		
	出口 入口出口 0.0816 [/s]		
	Top	slip	
	壁面	omega壁面函数	0.0816 [/s]
	支柱 omegaWallFunction 0.0816 [/s]		
	叶片/轮毂 omegaWallFunction 0.0816 [/s]		

OpenFOAM 模拟采用不可压缩压力-速度耦合方法 *pimpleDyM- Foam*，这是一种支持动态网格的 PIMPLE 求解器。PIMPLE 算法是 PISO（压力隐式分裂算子）[21] 与 SIMPLE（压力关联方程的半隐式方法）方程）[22]。PIMPLE 算法允许对其进行在一个时间步内使用外层校正循环，即，pimple 迭代。*pimpleDyMFoam* 计算采用残差控制 pimple 迭代，而非指定固定的迭代次数。一旦两者均已达到容差阈值。速度场和压力场方面，*pimpleDyMFoam* 求解器会退出当前外层校正循环并继续进入下一个时间步。在每个外校正循环中，使用一次压力校正和 4 次非正交压力校正循环。

2nd 阶隐式后向差分法用于时间离散格式。梯度格式采用2nd 阶中心差分法，并通过基于单元多维度的限制器进行约束 *(cellMDlimited)*。使用用户定义参数 $0 < K \leq 1$ 来控制梯度限制器，其中 $K = 0$ 返回真实的

梯度和 $K = 1$ 采用完全限制 [18]。根据先前的研究，所有 OpenFOAM 仿真均设定为 30 % 梯度限制，$K = 0$。3 [18]。在仿真时间最初的几秒内，速度散度采用 1st 阶迎风有界格式，直至解趋于稳定，随后切换为 2nd 阶迎风偏置速度散度格式*(linearUpwind)*，并由速度梯度进行限制。然而，动能和湍流比耗散率的散度仅采用 1st 阶迎风有界格式。表面法向梯度格式设为*corrected*，拉普拉斯格式设为*linear limited corrected* 0。5。

所有 OpenFOAM 模拟均在密西西比州立大学高性能计算协作中心的 Shadow 集群上运行。Shadow 是一台性能达 593 TeraFLOPS、拥有 33 600 个处理器的 Cray 集群。每个节点配备两颗十核 Intel Xeon E5-2680v2 处理器（每个节点有 20 个核心）和 64 GB 内存。模拟使用 40 个处理器运行

D. 求解器

如今，已有大量湍流模型可用于求解复杂的计算流体力学问题。要全面了解流动，直接数值模拟（DNS）是首选方案，因为它能够解析所有尺度的湍流。其次是大涡模拟（LES）方法，该方法能够解析流动中最大的涡。这两种方法对网格的要求都使其计算成本极高，因为网格必须小于所要解析的尺度。不仅如此，仿真时间还必须足够长，才能使流动脉动分量之间形成相关性。这些要求促使人们开发出多种混合湍流模型，这些模型使用自动混合函数，在雷诺平均纳维–斯托克斯模型与更复杂的大涡模拟模型之间切换。

使用 CFX 和 OpenFOAM 进行的建模均采用了 RANS方程。RANS方程通过对纳维–斯托克斯方程应用雷诺分解推导而来。通过雷诺分解，给定变量 φ 被分解为均值部分和脉动部分 [23]，

$$\varphi = \Phi + \varphi' \tag{1}$$

其中，Φ 是平均分量，φ' 是脉动部分。通过使用雷诺分解，会引入一些新项，称为雷诺应力。

推导出的方程为 RANS 方程，是大多数计算流体力学模拟的基础，因为与.....相比，其计算成本较低

与 LES 或 DNS 等其他选项相比。随着雷诺应力项的引入，一种闭合方法

需要用于满足所包含的额外变量。这通常以湍流模型的形式提供。

最常见的湍流模型是用于表示的两方程湍流模型。

其中包括湍动能项，以及湍流耗散、*E*或湍流耗散率项。然而，使用雷诺平均纳维–斯托克斯方法的一大问题是，由于平均过程会损失大量自由来流湍流，而湍流模型和网格尺寸又不够精确，无法捕捉流动中湍流的全部影响。不过，对于所讨论的模型而言，湍流并不是问题，因为用于验证的实验测试是在拖曳水池中进行的；理想情况下，水池中不会存在湍流。

最早的 *k-E* 模型之一由 Jones 和 Launder 开发 [24]。此后，不同作者对其进行了多次迭代，但其基本原理保持不变。研究发现，该模型在预测自由来流方面表现良好；然而，在预测黏性底层时，人们发现它会延迟分离，甚至完全阻止分离 [25] ，因为它在模拟中对逆压梯度缺乏敏感性。

k-ω 模型最初由 Wilcox 开发 [26] ，更适用于逆压梯度条件，因此能够更好地预测边界层流动。然而，它对剪切层外部的湍流频率非常敏感 [27] ，研究发现，自由来流湍流频率的变化可能会对结果产生显著影响。

Menter 的 [28] [29] 剪切应力输运（SST）模型旨在弥补 *k-E* 模型和 *k-ω*模型的不足。该模型通过引入混合函数，在求解自由流或边界层问题时实现两种模型之间的转换，从而发挥两者的优势 [29]。混合过程会自动进行，因此该模型无需用户输入。CFX 使用的是 [28] 提出的 SST 模型，但做了少量修改，详见 [20]。为尽可能保证比较的一致性，OpenFOAM 模型也采用了 [20]提出的 SST 模型。

E. 后处理

使用功率系数、推力系数和扭矩系数的方程，将各模型与实验模型进行比较，三者分别记为 C_P 、C_T 和 C_Q 。这些系数的方程如下所示。

$$C_P = \frac{Q_t\omega}{\frac{1}{2}\rho A U^3} \tag{2}$$

$$C_T = \frac{F_t}{\frac{1}{2}\rho A U^2} \tag{3}$$

$$C_Q = \frac{Q_t}{\frac{1}{2}\rho A U^2 R} \tag{4}$$

尖速比通过公式 (5) 确定。

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \tag{5}$$

通过引入额外的输运方程来描述流动的湍流特性。通常它们会

其中 U 是入口处的上游流体速度，单位为ms^{-1}； ρ 是水的密度，为 $997\ kg\ m^{-3}$，如

计算流体力学代码中所用的数值；A 是涡轮机的扫掠面积，单位为m^2,；R 是涡轮机的半径，单位为m；ω 是涡轮机的旋转速度，单位为$rads^{-1}$；Q_t 是涡轮机产生的扭矩，单位为Nm；F_t 是作用于叶片上的推力，单位为N。

III. 实验测试

实验测试的更多详细信息见 [30],，其中介绍了相关涡轮机的设计与特性，并展示了测试结果。为说明数值建模所用模型的设置，这里简要概述测试过程。图 4 展示了测试期间涡轮机的设置。



Fig. 4. INSEAN 拖曳水池中涡轮机的设置设　施。

计算流体力学模型的计算域尺寸按照实验测试所用拖曳水池的实际尺寸创建，但水池长度限制为 20 m，以减少单元数量，因为无需对整个 220 m 的计算域进行建模。水池宽 9 m，深 3.5 m。由于水池尺寸较大，涡轮机的阻塞比为 2 %，因此未添加阻塞修正系数 [31]。涡轮机的旋转轴位于水面以下 1.5 m 处。

在整个测试过程中，拖车速度保持恒定

，测试速度为 1 m s^{-1}。使用皮托管对拖曳速度进行辅助测量。涡轮机直径为 0.9 m，叶片采用 Wortmann FX63-137 型。涡轮机设计的详细说明见 [19], [30]。每次拖曳记录两个尖速比值，每次拖曳约获得 90 s 的数据。两次拖曳之间，水池保持静置，使产生的湍流消散后再开始下一次测试。

IV. 结果与讨论

A. 实验比较

首先，将 CFX 和 OpenFOAM 的结果与 III 节所述实验测试期间获得的结果进行比较。性能曲线的数值根据公式 (2)-(4) 得出。每个 CFX 模型均运行了 30 s。每个时间步均计算性能系数。平均值

对所有数值取平均后，得到每个尖速比下C_P、C_T 和C_Q 的最终值。在 Hawk 上使用 1 个节点、40 个核心运行时，每个尖速比需要约 60 小时的实际时间才能完成 10 000 个时间步。

OpenFOAM 结果也采用了相同的流程。不过，由于在最终选定 *linearUpwind* 方案之前，长时间测试了不同的速度散度方案，因此 OpenFOAM 与 CFX 模拟的时间序列有所不同。选定 *linearUpwind* 方案后，模拟继续采用固定时间步 0.003 s，并运行约 10 000 个时间步，以便与 CFX 模拟保持一致。每种尖速比工况均使用模拟的最后 15 s，以确保有足够多的收敛旋转周期可用于平均。由于具备可用的计算资源，且不受 HPC 许可证限制，所有模拟均可彼此独立启动，并在 Shadow 上同时运行，共使用 22 个节点。每次模拟平均每个时间步耗费 17 s 的 CPU时间；运行 10 000 个时间步约需 1888 CPU 小时，实际耗时约 47 h。

实验结果是在 INSEAN 进行测试时获得的。图中绘制了误差棒，以显示记录数据的+/− 标准差。有关测试和结果的更多信息，请参见 [30]。

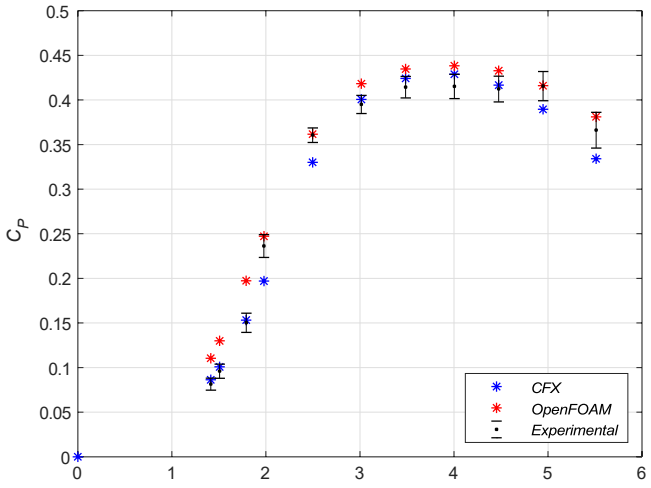

图 5. 功率系数曲线。

图 5 显示了 OpenFOAM、CFX 和实验结果的无量纲功率系数与尖速比之间的关系。角速度采用表 III 中的数值，这些数值由实验结果确定。与实验测试相比，CFX 对 C_P 的预测较为准确。在尖速比高于 5 的区域，CFX 开始低估；不过，数值模型很好地捕捉到了功率曲线的峰值，且该峰值落在 INSEAN 记录结果的误差棒范围内。

其中一个原因是，在较高尖速比区域，CFX 可能未能解析边界层流动，因此低估了翼型上的升力。由于流动的复杂性质以及流动更高的相对角速度

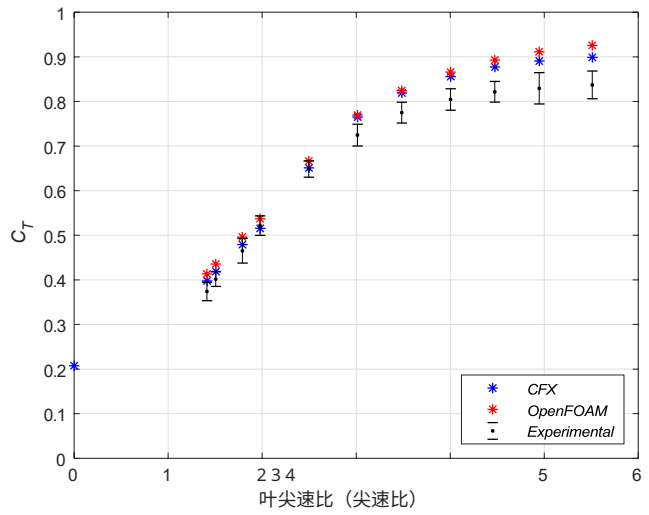

图 6。 推力系数曲线。

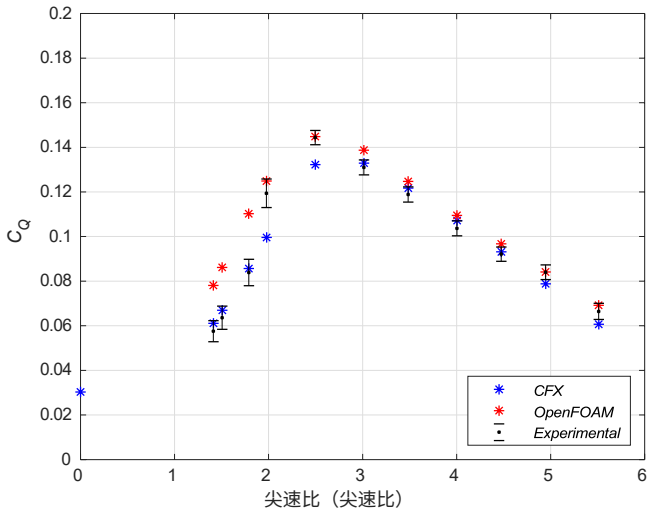

图7. 扭矩系数曲线。

在尖速比较高的区域，可能需要进一步细化网格。这也取决于所选的湍流模型。如果问题出在网格上，那么谨慎的做法可能是针对每个尖速比生成具有等效 y+ 值的网格，而不是为所有模型使用同一个网格。针对每个尖速比分别定制网格是一种耗时的方法，并且意味着较低尖速比区域的模型可能无法实现网格无关性。还需要进一步研究在曲线上所有点保持恒定y+ 加值的影响。由于模型运行时的y+ > 11 值，采用了壁面函数方法，而不是近壁面方法。这可能会影响对黏性底层的解析，尤其是在较高尖速比值下，从而导致数值结果与实验结果之间出现所观察到的差异。还需要开展进一步研究，以确定边界层中的节点数量如何影响对叶片扭矩和力的预测。

除尖速比 2.5 和 5 外，OpenFOAM 在所有尖速比下均不同程度地持续高估功率。峰值 C_P 为 0.437，出现在尖速比 4 时。看来，OpenFOAM 是一个稳定性差得多的求解器，但必须注意，该网格是使用 ANSYS 网格划分工具创建的，并未针对 OpenFOAM 进行优化，因此适用于 CFX 的网格未必最适合 OpenFOAM。为了解这一点，需要在相同的设置条件下，研究分别由 ANSYS 和 OpenFOAM 生成的多个网格，以确定各网格对所建模装置预测性能的影响。

图 6 展示了尖速比与C_T 的关系。CFX 的结果与实验数据再次表现出良好的一致性，直到尖速比约为 3。此时，数值结果似乎高估了作用于叶片上的力，这与功率捕获的情况正好相反。

OpenFOAM 的结果也与实验数据一致，直到尖速比达到 3。此时，叶片上的力开始被高估。随着尖速比超过 3，C_T 的高估程度逐渐增加。CFX 和 OpenFOAM 的结果似乎

正如预期，曲线趋于平缓；不过还需要进一步测试，才能确认这些曲线是否会开始相互重合。

图 7 所示的扭矩系数证实了图 5 中观察到的结果。这一点符合预期，因为数值模型和实验测试工况的角速度与流速相同。扭矩似乎在曲线不同位置均被低估，而推力似乎被高估，这进一步说明有必要针对每个给定的尖速比细化网格。

B. 数值比较

图 8 和图 9 分别展示了尖速比为 4 时叶片 1 上扭矩和力的时间序列快照。由于模型收敛所需的时间不同，x 轴上的时间也有所不同。随着

前文提到，CFX 约在 5 s 后达到收敛，因此截取该时刻的快照，以展示完整的两次旋转。OpenFOAM 模型最初采用几种不同的设置条件进行运行，直到确定最终设置。每次仿真都是在前一次之后运行的，因此各图中显示的时间较长。如图 5、6 和 7 所示，在尖速比 4 时，OpenFOAM 得出的 C_P 和 C_T 结果与 CFX 结果的偏差分别在 2 % 和 1 % 以内。

CFX模型呈现出数值模型通常具有的特征，即扭矩和力的曲线都非常平滑。所采用的较小时间步对应于每个时间步旋转1.5°。

图 8 和图 9 展示了尖速比为 4 时，叶片 1 在两个完全收敛旋转周期内所受扭矩和力的瞬时变化。OpenFOAM 曲线似乎在两种解之间波动。这一现象在叶片经过支柱后、旋转周期结束前即将再次经过支柱的这段时间内最为明显。该现象似乎仅出现在尖速比为 4 的情况下，可能与涡脱落有关；但要确认这一点，还需要对流动进行更深入的分析。

在 OpenFOAM 中，叶片所受力和扭矩的时间历程图中可以看到次级振荡。

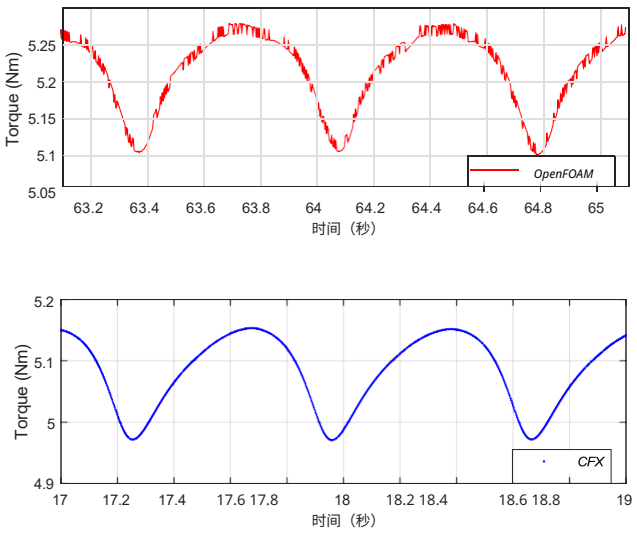

图 8. 从数值模型中提取的瞬时扭矩值，显示了尖速比为 4 时的两个完整旋转。

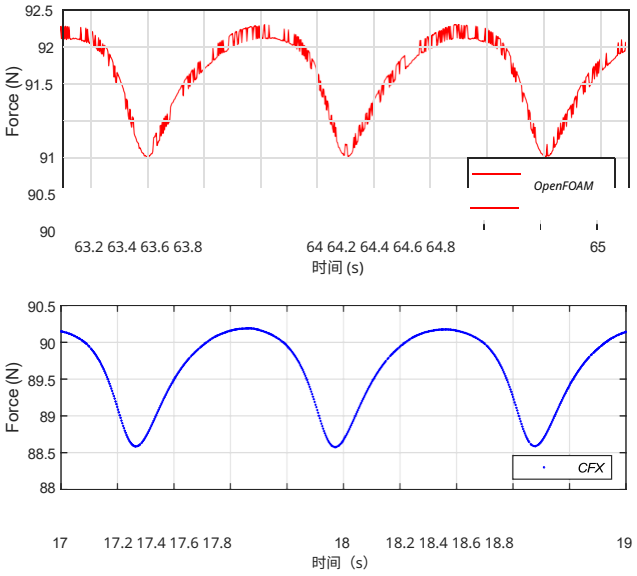

图 9. 数值模型提取的瞬时力值，显示尖速比为 4 时的两个完整旋转周期。

用于较低尖速比区域的模型。它们不像 CFX 那样平滑。随着尖速比增加，次级振荡的幅度逐渐减小。当尖速比为 3.5 时，次级振荡不再出现。图 10 中可以看到次级振荡。

CFX 设置为每个时间步执行 10 次迭代，以帮助实现收敛。ANSYS 建议将均方根（RMS）残差目标设为 $1e^{-6}$ 或更低，以实现充分收敛 [32]。在 CFX模型中，质量和动量的 RMS 值均低于 $1e^{6}$。同样，通过表达式监测扭矩和力也显示出收敛，因为每个完整旋转周期均得到相同的数值。OF 使用压力和速度来确定收敛。压力求解器每个时间步执行 25–50 次迭代，速度求解器执行 5–10 次迭代。压力求解器的残差在每个时间步均达到 $1e^{-5}$。对于三个速度分量 U_X、U_Y 和 U_Z，残差分别约为 $1e^{5}$、$1e^{5}$ 和 $1e^{7}$

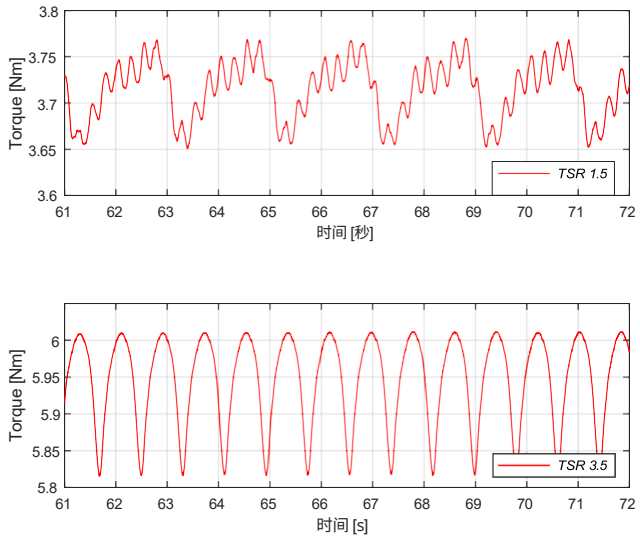

图 10. OpenFOAM 在较低尖速比下出现的次级振荡。当尖速比高于 3.5 时，这些振荡会停止。

导致叶片上的扭矩和力值出现波动。

V. 结论

本研究旨在开展范围界定，对比 CFX 和 OpenFOAM 两个数值软件包在预测水平轴潮汐涡轮机性能时的表现。研究结果与现有实验数据进行了比较。OpenFOAM 和 CFX 均显示出与现有实验数据较为合理的一致性。对于 C_P，在尖速比达到 4.5 之前，CFX 结果均处于实验测试的误差范围内。对于中间

分别如此。与CFX模型相比，OF模型中观察到的残差值略大，这可能是因为

尖速比 2.5 至 4.5 之间的曲线部分。在较高尖速比区域，OpenFOAM 的预测结果优于 CFX。两种模型均高估了C_T，但其精度仍足以对设备的预期性能作出合理且有依据的表征。未来对不同数据集进行比较，将有助于用户了解仿真在更广泛的流动条件和设备范围内的精度。

通过观察 OpenFOAM 数值结果的时间历程发现，在低尖速比区域（尖速比最高达到 3.5）出现了次级振荡，而 CFX 结果中并未出现这种现象。这表明，在任何计算流体力学仿真中，网格仍然是一个基本的考量因素。如图 5、6 和 7 所示，在尖速比为 4 和峰值功率工况下，OpenFOAM 得出的C_P和C_T结果与 CFX 结果的偏差分别在 2% 和 1% 以内。

VI. 致谢

作者还要感谢 INSEAN 的工作人员在测试期间提供的协助。本研究使用卡迪夫大学高级研究计算部（ARCCA）的计算设施完成。J. Bowman、S. Bhushan 和 D. Thompson 谨此感谢密西西比州立大学先进车辆系统中心的支持。所有 OpenFOAM 模拟均在

密西西比州立大学高性能计算协作中心的 Shadow HPC 系统上完成。

参考文献

[1] 英国能源与气候变化部。英国《可再生能源路线图》2013年更新版 76，2013。（11月）：。[2] T. J. Hammons。英国及全球潮汐能的发展，以减少温室气体排放。《国际工程与商业管理期刊》，2011。[3] T Ebdon、D M O Doherty 和 T O Doherty。使用先进湍流模型模拟海洋潮流涡轮机尾流。[4] S Ordonez-Sanchez、K Porter、C Johnstone、M Allmark、T O'Doherty、R Ellis、C Frost 和 T Nevalainen。预测潮流涡轮机转子不平衡问题的数值建模技术。第十二届欧洲波浪与潮汐能会议论文集，第{752\hyphen 1}—{752\hyphen 9}页，2017。[5] Paul Mycek 、 Benoît Gaurier 、 Grégory Germain、Grégory Pinon 和 Elie Rivoalen。湍流强度对海洋潮流涡轮机运行特性影响的实验研究。第一部分：单台涡轮机。《可再生能源》，66：729–746，2014。[6] Tom Blackmore、Luke E. Myers 和 Abubakr S. Bahaj。湍流对潮汐涡轮机的影响：对性能、叶片载荷和状态监测的启示。《国际海洋能源期刊》，14：1–26，2016。[7] F. Maganga、Grégory Germain、J. King、Grégory Pinon 和 Elie Rivoalen。确定流动特性对海洋潮流涡轮机运行影响的实验研究。载于第八届欧洲波浪与潮汐能会议论文集，2009。[8] Stephanie Ordonez-Sanchez、Kate Porter、Carwyn Frost、Matthew Allmark 和 Cameron Johnstone。波浪与潮流相互作用对潮流涡轮机性能的影响。第三届亚洲波浪与潮汐能会议论文集，第394–403页，2016。[9] Carwyn Frost。流向对潮流涡轮机的影响。博士论文，2016。[10] Sarah Tatum、Matthew Allmark、Carwyn Frost、Daphne O'Doherty、Allan Mason-Jones 和 Tim O'Doherty。剖面流和表面重力波条件下潮流涡轮机的计算流体力学建模。《国际海洋能源期刊》，15：156–174，2016。[11] S.C. Tatum、C.H. Frost、M. Allmark、D.M. O'Doherty、A. Mason-Jones、P.W. Prickett、R.I. Grosvenor、C.B. Byrne 和 T. O'Doherty。波浪–潮流相互作用对潮流涡轮机性能与载荷特性的影响。《国际海洋能源期刊》，14：161–179，2016。[12] A. Mason-Jones、D.M. O'Doherty、C.E. Morris 和 T. O'Doherty。速度剖面和支撑结构对潮流涡轮机性能的影响。《可再生能源》，52：23–30，2013。[13] Y. M. Dai 和 W. Lam。直叶片达里厄型潮汐涡轮机的数值研究。土木工程师学会论文集——能源，162(2)：67–76，2009年5月。[14] Richard McSherry、Jamie Grimwade、Ian Jones、Simon Mathias、Andrew Wells 和 Andre Mateus。通过实验室实验验证潮汐涡轮机性能的三维计算流体力学建模。*EWTEC 2011*论文集，2011。[15] A. S. Bahaj、A. F. Molland、J. R. Chaplin 和 W. M J Batten。在空化水洞和拖曳水池中，测量海洋潮流涡轮机在不同水动力流动条件下的功率与推力。《可再生能源》，32(3)：407–426，2007。[16] W. M.J. Batten、A. S. Bahaj、A. F. Molland 和 J. R. Chaplin。经实验验证的水平轴潮汐涡轮机水动力设计数值方法。《海洋工程》，2007。[17] R M Stringer、J Zang 和 A J Hillis。采用非定常雷诺平均纳维–斯托克斯方程计算宽雷诺数范围内圆柱体周围的流动。《海洋工程》，87：1–9，2014。[18] E. Robertson、V. Choudhury、S. Bhushan 和 D. K. Walters。OpenFOAM数值方法和湍流模型在不可压钝体绕流中的验证。《计算机与流体》，2015。[19] Robert Ellis、Matthew Allmark、Tim O Doherty、Allan Mason-jones、Stephanie Ordonez-sanchez、Kate Johannesen 和 Cameron Johnstone。缩尺水平轴潮汐涡轮机叶片的设计流程。第四届亚洲波浪与潮汐能会议论文集，（10月），2018。[20] F R Menter、M Kuntz 和 R Langtry。剪切应力输运湍流模型的十年工业应用经验。《湍流、传热与传质 *4*》，4：625–632，2003。[21] R. I. Issa。通过算子分裂法求解隐式离散化的流体流动方程。《计算物理学杂志》，1986。[22] S. V. Patankar 和 D. B. Spalding。三维抛物流动中热、质量和动量传递的计算方法。《国际传热与传质期刊》，1972。[23] H K Versteeg 和 W Malalasekera。《计算流体力学导论》，第1卷。2007。[24] W. P. Jones 和 B. E. Launder。采用两方程湍流模型计算低雷诺数现象。《国际传热与传质期刊》，16 1130，1973 6 1119( )：–。[25] S J Kline、B J Cantwell 和 G M Lilley Stanford。1980—81年AFOSR-HTTM斯坦福复杂湍流会议：计算与实验比较，第一、二、三卷。编者。《流体力学杂志》，第125页，2018。[26] David C. Wilcox。先进湍流模型中尺度确定方程的重新评估。《*AIAA*期刊》，26(11)：1299–1310，1988。[27] F. R. Menter。自由来流数值对k-omega湍流模型预测结果的影响。《*AIAA*期刊》，30 1659，1992 6 1657( )：–。[28] F. R. Menter。用于空气动力流动的分区两方程k-w湍流模型。载于第*23*届流体动力学、等离子体动力学与激光会议，1993。[29] F. R. Menter。面向工程应用的两方程涡黏性湍流模型。《*AIAA*期刊》，32 1605，1994 8 1598( )：–。[30] Matthew Allmark、Robert Ellis、Kate Porter、Tim O Doherty 和 Cameron Johnstone。用于研究动态装置载荷的实验室缩尺潮流涡轮机的开发与测试。第四届亚洲波浪与潮汐能会议论文集，2018。[31] Robert Howell、Ning Qin、Jonathan Edwards 和 Naveed Durrani。小型垂直轴风力涡轮机的风洞与数值研究。《可再生能源》，35(2)：412–422，2010。[32] ANSYS Inc。*ANSYS CFX*参考指南。2018。