

特斯拉涡轮机运行性能研究综述^{*}

李永国^{1,2} 杜杰^{*,1,2} 郑丁健^{1,2} 覃灿^{1,2} 朱秋莹^{1,2}

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 上海海洋可再生能源工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 涡轮机是海洋能转化利用过程中重要的机械结构, 能够将流体的动能转换为旋转的机械能, 带动发电机运转发出电能, 已经广泛地应用于海洋能发电领域。传统意义上的叶片涡轮结构较为复杂, 使用时容易发生工作介质泄露等问题, 这将很大程度上降低涡轮机的使用效率。特斯拉涡轮机因结构简单、制造公差要求较低、密封性好等优点又重新回到了研究者的眼中。特斯拉涡轮机的运行性能决定着能量转换效率的高低, 研究发现, 特斯拉涡轮机目前转换效率还不算高, 在工程实践应用中还无法大量普及, 因此提高特斯拉涡轮机的使用效率就尤为重要。文中对影响特斯拉涡轮机运行性能的因素进行了归纳与分析, 介绍了特斯拉涡轮机的机械结构、应用领域和研究现状, 列举了国内外研究人员对特斯拉涡轮机进行的实验以及研究, 总结了特斯拉涡轮机的数值模拟方法, 为提高特斯拉涡轮机的能量转化效率和在日后的实际应用中提供一定的参照依据, 最后展望了特斯拉涡轮机在小型海洋能利用装置上的应用前景。

关键词: 特斯拉涡轮机; 边界层效应; 运行性能; 小型装置

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2021.09.006

Review of Tesla Turbine Operating Performance Research^{*}

LI Yongguo^{1,2} DU Jie^{*,1,2} ZHENG Dingjian^{1,2} QIN Can^{1,2} ZHU Qiuying^{1,2}

(1. School of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Marine Renewable Energy Engineering and Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: Turbine is an important mechanical structure in the process of ocean energy transformation and utilization, which can convert the kinetic energy of the fluid into rotating mechanical energy and drive the generator operation to generate electricity, which has been widely used in the field of Marine energy power generation. In the traditional sense, the blade turbine structure is a little bit complex, easy to use the working media leakage and other problems, which will greatly reduce the efficiency of turbine use. Tesla turbines due to simple structure, low manufacturing tolerance requirements, good sealing and other advantages are back in the eyes of researchers, and the operating performance of Tesla turbines determines the level of energy conversion efficiency, through the study found that Tesla turbines are not yet high conversion efficiency, in engineering practice applications can not be widely used, so it is particularly important to improve the efficiency of tesla turbines. This paper summarizes and analyzes the factors affecting the performance of Tesla turbines, introduces the

^{*} 国家自然科学基金面上项目“基于磁流体发电原理的海洋可再生能源利用中的基础问题研究”(51876114), 上海市工程技术研究中心建设计划, 上海市科学技术委员会资助项目“上海海洋可再生能源工程技术研究中心”(19DZ2254800)

^{**} E-mail: 15032792931@163.com; Tel: 15032792931

mechanical structure, application field and research status of Tesla turbines, lists the experiments and studies carried out by researchers at home and abroad on Tesla turbines, summarizes the numerical simulation methods of Tesla turbines, provides some reference basis for improving the energy conversion efficiency of Tesla turbine and in future practical application, and finally looks forward to the application prospects of Tesla turbines in small marine energy utilization devices.

Keywords: Tesla Turbine; Boundary Layer Effect; Run Performance; Small Equipment

涡轮机是利用流体冲击叶轮转动而产生动力的机械,已经广泛地应用于海洋能发电领域中^[1]。传统涡轮机的结构形状复杂,在生产制造时会产生误差导致密封不好,造成泄露问题;另外,由于流体介质的混杂性与不确定性,例如当工作介质为纳米流体时会腐蚀涡轮机的叶片,导致涡轮机使用出现问题^[2]。特斯拉涡轮机以流体剪切力驱动、结构简单、密封性能好。工作原理是边界层理论^[3],利用工作流体的剪切力使转子旋转,当流体进入涡轮机内部时,由于流体粘度和粘滞性会与圆盘发生动量交换,带动圆盘运动。特斯拉涡轮机在高速运转的情况下内部会产生压力梯度,与转子圆盘旋转的离心力相互抵消,能够极大地避免在转速过高情况下轴承部件的损坏^[4]。在涡轮机使用领域的研究中,由于基于透平压缩机在跨临界二氧化碳的热泵循环系统中的应用^[5]以及作为有机朗肯循环(Organic Rankin Cycle, ORC)等多种循环系统的压缩机系

统还处于摸索研究阶段,因此,特斯拉涡轮机在此机械特性方面具有巨大的发展与应用的潜力。本文简述了特斯拉涡轮机的机械结构以及目前的实际应用情况,列举了国内外学者对涡轮机的数值模型研究方法,并对影响特斯拉涡轮机运行性能的一些因素进行了总结与分析,深入探究影响涡轮机运行效率的因素,讨论涡轮机中涉及到的关键性问题,以便为特斯拉涡轮机在海洋能开发利用中提供理论依据和研究支撑。

1 特斯拉涡轮机的机械结构

特斯拉涡轮机的典型结构如图 1 所示,特斯拉涡轮机的转子由一系列平行且同心的圆盘组成,这些圆盘安装在轴上,定子、喷嘴、涡轮机外壳安装在转子圆盘的外侧。特斯拉涡轮机是一种可以利用水力或风力驱动的原动机,作为水力发动机或风力发动机。机械运转时工作介质在定子通道中加速,运动轨迹如图 1c 中所示,以近似切向圆盘方向地射入转子中,在定子出口处工

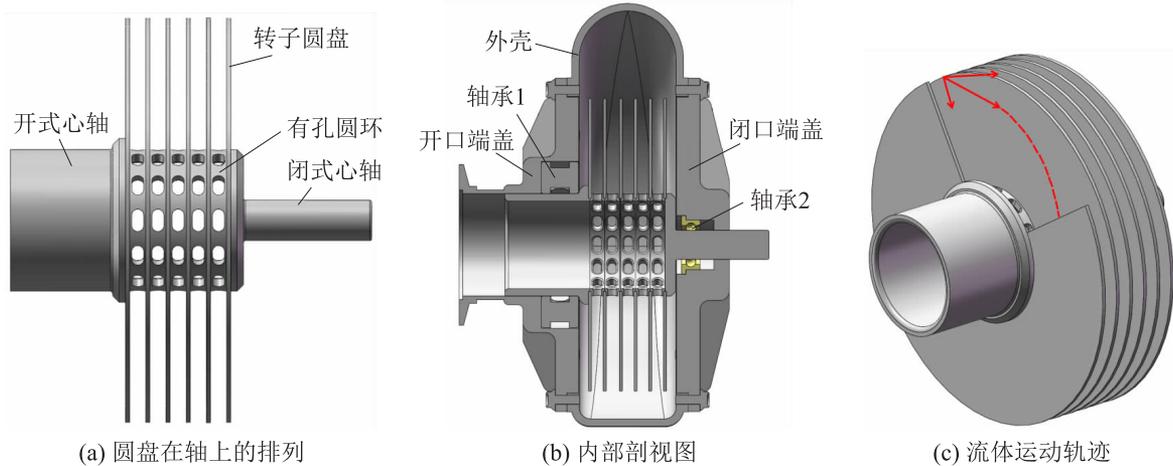


图 1 特斯拉涡轮机械结构
Fig. 1 Tesla Turbine Mechanical Structure

质获得最高流速,以螺旋式的运动轨迹通过圆盘通道,最后通过围绕轴的圆盘孔或者狭槽排放到涡轮机外部。涡轮机内部的圆盘之间存在间隙,并非相互紧密排列,两个相邻光盘之间的间隔称为光盘通道^[6]。特斯拉涡轮的结构简单特殊,尤其在低负荷下运行效率较高^[7],在微型、小型的发电装置中具有很大的应用前景。除此之外,由于结构的特殊性以及不同于传统涡轮机的工作原理,还具有成本费用低、易于制造和维护等优点。近十几年来,专家对该涡轮机的研究越来越深入,进行了大量的理论、实验和数值研究^[6]。

2 特斯拉涡轮机的应用领域

韩凯^[8]等基于特斯拉涡轮机摩擦纳米发电机,设计并制备了一套简单、高效的自驱动 N_2 放电合成氨系统;Carey^[9]等利用特斯拉涡轮机作为小型有机朗肯循环热能和动力系统的膨胀器进行性能探究,介绍了涡轮机转子动量转移的一维理想化模型,该模型表明在最佳的操作条件下,可以实现 75% 以上的熵效率转换,还讨论了涡轮机设计的可扩展性;顾春伟^[10]等针对低品位能源利用问题,改进了特斯拉涡轮的一维模型,该模型采用一种非维公式来确定涡轮性能特性的无量维参数,评价工作流体特性和运行条件对涡轮机的影响,确认了特斯拉涡轮机是小型有机朗肯循环系统的潜在选择;Hasan^[11]等研究使用特斯拉涡轮机作为汽车中替代空调压缩机驱动单元的可能性,而不是传统的连接压缩机转子与车辆发动机曲轴带或链的方法。Damodhar^[12]等针对农村频繁停电,家庭用电无法满足需求等问题,结合特斯拉涡轮机在低负荷流量情况下运行性能更优的特性,设计了一种便携式水轮机,该水轮机可以在农村低速水流的河流地区使用,为农

村地区电力匮乏、电力短缺等实际问题提供了有效保障;Lampart^[13]等探究在 20KW 微型发电厂特斯拉涡轮机的使用情况,通过计算得到的流量效率表明,与经典的小叶片涡轮相比,特斯拉涡轮机具有很强的竞争力;Fateme 等^[14]在智能配水系统中使用特斯拉涡轮,在适合管道水网相关尺寸和流量的条件下,实现了有效的功率输出,显示了特斯拉涡轮机在智能配水系统中能量收集的巨大潜力。同时,也出现了许多利用特斯拉涡轮机的相关专利产品,北京航天新风机械设备有限公司的张遥^[15]发明的一种用于计算机水冷系统的特斯拉涡轮散热器,冷却液通过水管进入特斯拉涡轮机,驱动涡轮机带动风扇转动散热,利用水动力驱动,无需单独供电;上海海洋大学的李永国^[16]等发明的一种结合特斯拉涡轮的振荡水柱式波浪能发电装置,将特斯拉涡轮机与振荡水柱式波浪能发电装置结合起来,利用涡轮机的高速转动带动发电机发电,实现了效率提升。

3 特斯拉涡轮机的数值模拟方法

3.1 数学模型以及计算方法

3.1.1 数学模型

特斯拉涡轮机内部的流体流动属性能够利用数学模拟方法来建立模型,Murata^[17]等为了获得圆盘式摩擦泵的性能和最佳尺寸,对圆盘之间的流量特性进行了分析,发现圆盘外部是湍流,圆盘内部是层流,这为研究涡轮机内部的流体类型建立了基础。Deam^[18]等为了分析特斯拉涡轮机中的不可压缩性和一维流动问题,研发了一种简单的分析模型。Talluri^[19]等利用工程方程求解器中的指定程序,开发了一种用于 ORC 应用的特斯拉涡轮机设计程序,通过评估各部件的损耗并引入了创新转子模型,实现了一种整体优化方

法,评估三种不同膨胀机尺寸的涡轮机结构,以展示特斯拉涡轮机的性能潜力。在低质量流率的条件下,使用正己烷流体时,将压力、转速的不同数值输入转子模型中,计算得到图 2 的结果,在低质量流率的条件下,可以得到较高的转子效率,但是功率输出较低^[1]。

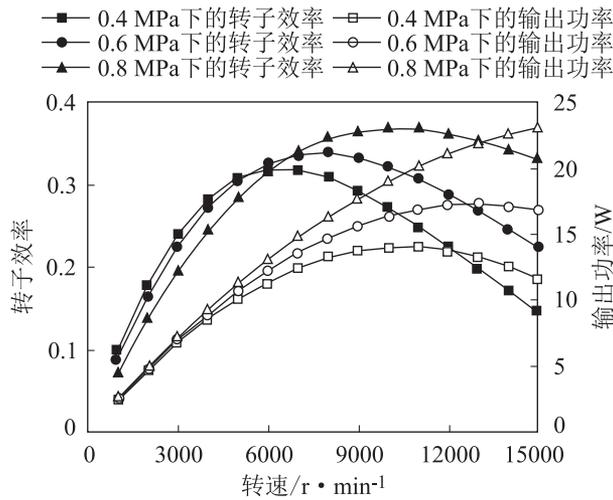


图 2 低质量流率条件下的计算结果^[1]

Fig. 2 Calculations under Low Mass Flow Rates^[1]

3.1.2 计算方法

运用传统的计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 建模分析模拟,一般首先定义特斯拉涡轮机的几何尺寸,并将三维模型在 ANSYS 中生成一致的网格,有时为了找到最优网格划分,还需要进行网格依赖性测试,定义所需要的边界条件,复杂几何结构中的边界要在所有固体表面、进气口、出口处定义,对于入口和出口段,设置固定静压,对所有固体施加防滑条件,圆盘被定义为在转子轴上旋转的移动壁面。旋转盘的所有表面绝热条件,涡轮外部受到自由对流的影响等,选择合适的求解方法进行求解,观察求解结果是否满足要求,若不满足修改条件后初始化重新求解。

Hoya^[20]等设计并制造了一台特斯拉盘式涡轮机和一个柔性实验平台来分析涡轮机的性能

和效率,开发了一种新的简单方法,即角加速度法来测量特斯拉涡轮机输出扭矩、输出功率以及整体能量损失;Couto 等^[21]提出了一项简单较全面的计算程序,仅使用基本的流体力学知识来估计特斯拉涡轮机完成规定工作所需要的圆盘数量。假定在给定的盘内圆周处,流动雷诺数小于 2300。该计算基于以下方程:

$$\delta \approx 5 \sqrt{\frac{\nu \cdot (r_1 - r_2)}{U}} \quad (1)$$

式中: δ 为圆盘数量; ν 为流体运动粘度, m^2/s ; r_1 为圆盘的內径; r_2 为圆盘外径, mm ; U 为流体在进口处的流速, m/s 。

Guha^[22]提出了一种系统和全面的计算流体力学的研究方法,该方法将满足实际约束条件,并且能够提供高功率和效率值。与流体摩擦只起有害作用的传统涡轮机械中的流动不同,流体摩擦在特斯拉涡轮机中起着双重作用,增加了径向压降的有害作用,同时提高发电效率的有益作用。通过对流体摩擦的定性和定量的分析,使流体摩擦的双重作用达到一种动态平衡,优化涡轮机的运行性能,实现效率最大化。

3.2 特斯拉涡轮机的具体建模仿真方法

为了确认特斯拉涡轮机内部流体的路径问题, Sengupta^[23]等采用三维计算流体力学 (CFD) 仿真的方法,利用 ANSYS 中的 Fluent 模块对特斯拉涡轮机内部的三维流场和流道进行了计算流体力学分析和研究,并用纳维 - 斯托克斯方程验证简化数学模型的可靠性。得到图 3 的结果,当切向速度比 $\gamma \geq 1$ 时,流动路径线的长度、形状与方向受到较小的影响;当 $\gamma > 10$ 时,路径线基本不受影响;当 $\gamma < 1$ 时,路径线的长度、形状与方向受到的影响十分显著 (γ 代表转子入口流体的平均绝对切向速度与圆盘旋转速度的比值)。

4 特斯拉涡轮机性能的影响因素

4.1 特斯拉涡轮机喷嘴的影响

W · Rice 和其团队开发了特斯拉涡轮机转子内部流动的先进数值研究模型,以空气为流体,评估出导致总效率下降的主要部件是喷嘴,喷嘴是特斯拉涡轮机的重要组成部分,其作用是在转子进口处产生必要的切向流,并将增压室中的流体压力能转换为喷嘴出口处的动能,但是对于喷嘴的研究较少。后续研究发现能量和压力在特斯拉涡轮机喷嘴处的损失制约着涡轮机的整机运行效率^[24]。涡轮机中使用的喷嘴在横截面处一般为矩形状,如图 4 所示,喷嘴具有将工作流体均匀分布在涡轮盘之间的作用^[25]。

Rice^[26]通过将喷嘴的几何角度减少以获得更高速度的流动,在他的研究中,用流量特性来评价喷嘴中的流量损失。在小型喷嘴中,边界层是一个关键因素,因为流体的边界层可能占据喷嘴的大部分,这可能由于粘性损失而导致效率下降^[27],因此在研究特斯拉涡轮机喷嘴的性能时,就需要考虑其影响,高速的流体将导致更高的雷诺数,使边界层的厚度更小,从而有可能使喷嘴实现更高的效率^[28]。为了优化特斯拉涡轮机的进流性能,Guha^[29]设计了一种新型收敛性喷嘴,这大大减少了损失并且提高了射流速度分布的均匀性。Guha 在此喷嘴上游增加增压室,如图 5 所示,用来最小化湍流的影响,使流体流动变得更加均匀以此减少能量损失。

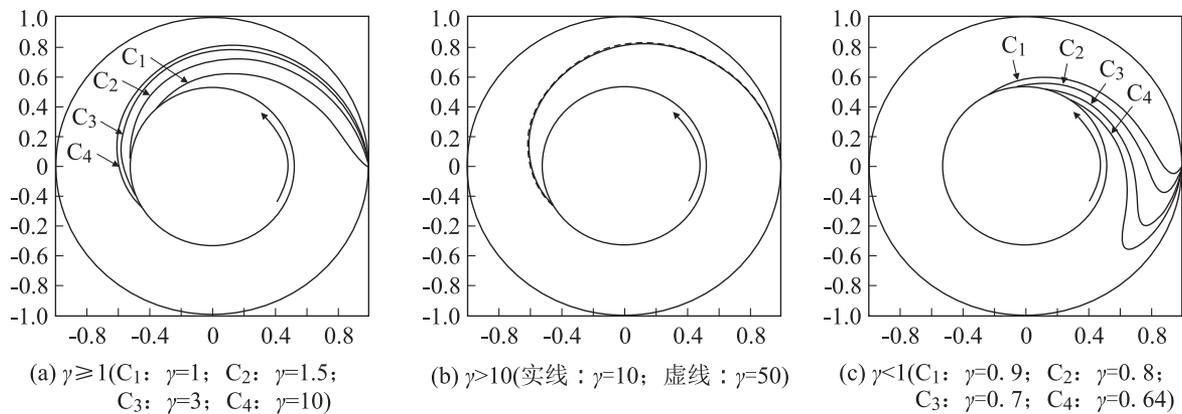


图 3 当 $\gamma \geq 1$ 、 $\gamma > 10$ 、 $\gamma < 1$ 时的相对流动路径^[23]

Fig.3 Relative Flow Path when $\gamma \geq 1$ 、 $\gamma > 10$ 、 $\gamma < 1$ ^[23]

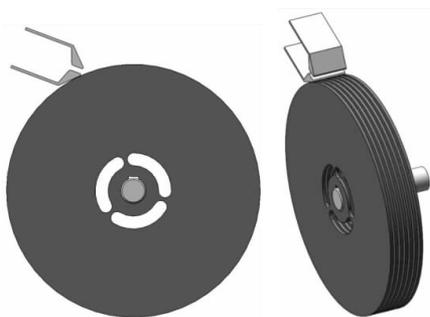


图 4 定位喷嘴在特斯拉涡轮机的位置^[25]

Fig.4 Location of Nozzle at Tesla Turbine^[25]

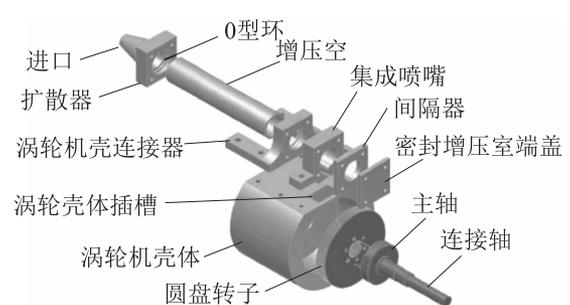


图 5 利用气室完成进气的新型喷嘴^[29]

Fig.5 New Nozzle with Air Chamber^[29]

喷嘴的几何形状改变会影响涡轮机性能,喷嘴的几何形状可以通过更换喷嘴插入件进行更改,可以使槽形喷嘴的宽度适应转子的不同宽度,从而可以阻塞喷嘴的未使用区域,并将流体更有效地引导至转子,从而避免主要流体泄露,提高流体使用效率(图 6)^[20]。

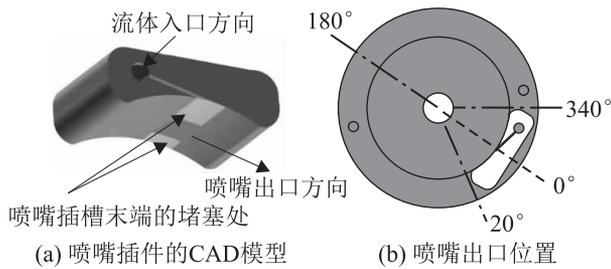


图 6 喷嘴插件的 CAD 模型和喷嘴出口位置^[20]

Fig. 6 CAD Model of the Nozzle Plug-in and Nozzle Outlet Position^[20]

喷嘴数量是涡轮机的基本几何参数,直接影响质量流量,从而影响涡轮机的运行性能。Neckel^[25]等对特斯拉涡轮机的收敛-发散喷嘴进行了实验研究,结果表明,使用恰当的喷嘴形状可以避免流体运动时冲击波的影响并降低总压损失。总压损失不是评估喷嘴性能的唯一相关参数,喷嘴出口区域的流量均匀性等也表征了喷嘴的整体性能。Guha 和 Smiley^[29]在三种不同情况下测试了喷嘴和进气口处的损失,探究涡轮机的运行性能:1) 普通喷嘴和涡轮机进口组合,在涡轮机运行异常的情况下,喷嘴在涡轮机内部测试了它的效率;2) 带有增压进口喷嘴,将普通喷嘴用螺栓固定在新的增压室入口上,这使原本的普通喷嘴本身的性能可以被测量(现在入口的损失可以忽略不计);3) 新型增压集成喷嘴,对新型增压集成喷嘴进行测试,以确定使用增压室可实现的效率提高程度。图 7 展示了以上三种情况的比较。可以看出,三种喷嘴的性能随着出口压力的增加而增加。比较不同喷嘴的性能可以看出,

原喷嘴和涡轮进口集成的性能最差,而增压集成喷嘴的性能最高。

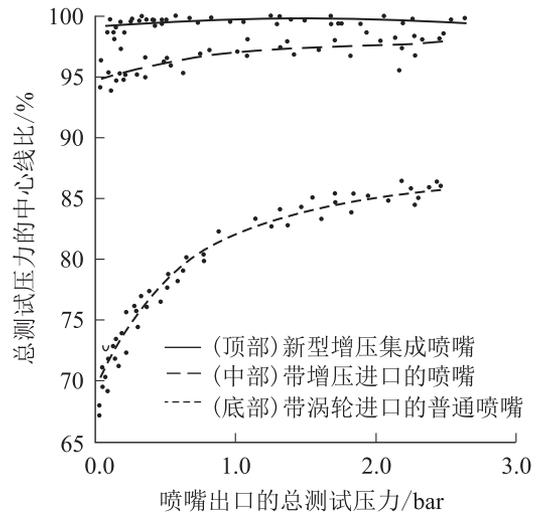


图 7 不同进口喷嘴的性能比较^[29]

Fig. 7 Comparison of Performance of Nozzle with along the major Dimension of the Nozzle Outlet. ^[29]

同时对不同宽度的喷嘴也进行了实验研究,对于所有测试喷嘴,新的增压集成喷嘴将总压力损失保持在 1% 以下,最大宽度为 3 mm。对于带有涡轮进口组件的普通喷嘴,随着喷嘴宽度的增加,总压损失进一步显著增加。图 8 可以看出,喷嘴和入口对喷嘴流量的均匀性有十分明显的影响。

4.2 特斯拉涡轮机转子圆盘的影响

19 世纪,纳维与斯托克斯建立了维纳-斯托克斯方程,简称 $N-S$ 方程^[30]。1904 年,普朗特经过大量的实验研究,建立了边界层理论^[31],对 $N-S$ 方程进行了简化,用于计算边界层内流动状态和流固间的粘性摩擦力^[3]。特斯拉涡轮机是利用边界层效应工作的,根据流体力学中壁面的无滑移条件,盘形转子在旋转时,液体粘附在转子表面使其受到粘性剪切应力的作用,即转子旋转时受到液体的摩擦阻力作用,摩擦阻力与流体和圆盘的接触面积大小、盘形转子表面的粗糙

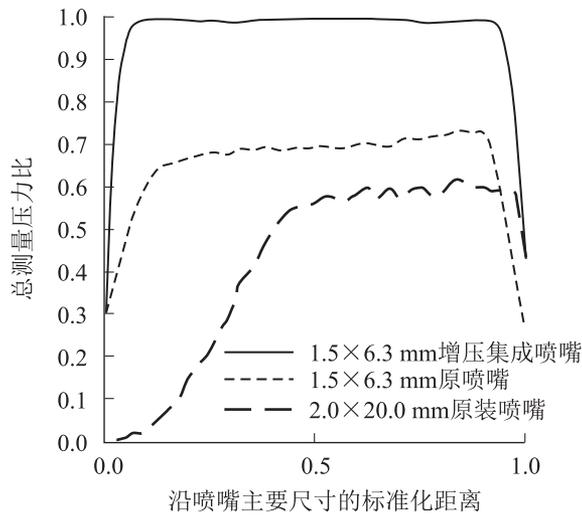


图 8 实验总压沿喷嘴出口主要尺寸移动的结果^[29]

Fig. 8 Results from Experimental total Pressure Traverses different Inlets^[29].

度、流体的粘性大小等有关^[3]。因此圆盘间的间距、圆盘的粗糙度、圆盘的厚度以及圆盘边缘的形状等会影响涡轮机内部流体的流动状态,从而影响涡轮机的运行性能。

4.2.1 特斯拉涡轮机圆盘间距的影响

齐文娇^[32]等研究发现,随着盘间距的增加,特斯拉涡轮机的等熵效率先增加后降低,存在一个最大值和一个高效率范围,使等熵效率分别达到最大值并保持在较高水平。因此在设计特斯拉涡轮机时,盘间距的大小应该选择其高效率范围之内。

Galindo^[33]等也研究了圆盘间距对特斯拉涡轮机效率的影响,通过人为地将转子圆盘的间距改变为 0.3、0.6、0.9、1.5 和 2.5 毫米,保持其他条件不变,在不同的圆盘间距下测试涡轮机的效率,实验结果如图 9 所示,发现间距在 0.9 毫米时,获得了最高的效率,并且效率(η)在 18.4% ~ 50% 的范围内,值得注意的是当圆盘间距在 0.3 毫米和 2.5 毫米时,效率到达相似值。这是因为

如果圆盘的间距过小时,由于粘性力的存在,流体不会经过这个空间;当圆盘间距过大时,流体损失粘性力,其动能不能很好地传递到转子上。

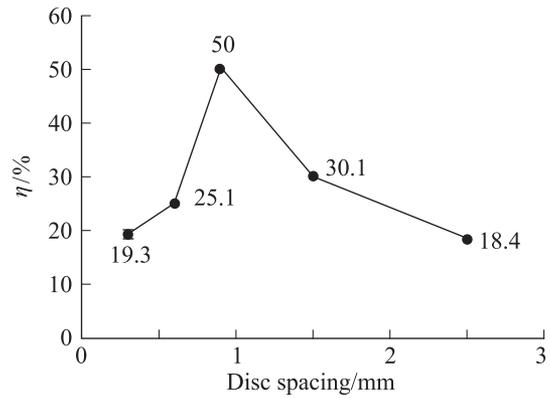


图 9 涡轮效率与圆盘间距的关系^[33]

Fig. 9 Relationship between Turbine Efficiency and Disc Spacing^[33]

4.2.2 特斯拉涡轮机圆盘粗糙度的影响

圆盘表面的粗糙度对涡轮机性能至关重要,它可能导致边界层湍流的增加,从而使圆盘壁上的剪切应力增加。Rusin^[34]利用 CFD 分析,建议确定粗糙度参数,如图 10 使用泰勒-霍布森·苏尔特罗尼奇 3 + 粗糙度测量仪,测量圆盘表面的粗糙度。

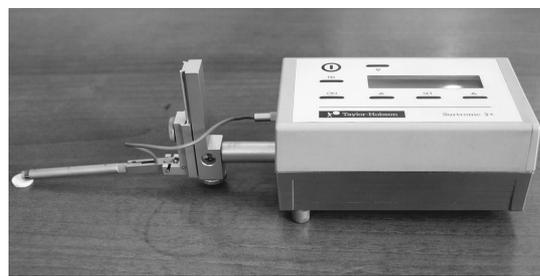


图 10 泰勒-霍布森·苏尔特罗尼奇 3 + 粗糙度测量仪^[34]

Fig. 10 Taylor-Hobson-Sirte Ronich 3 + Roughness Meter^[34]

在 5 个不同的半径处测量,记录数据,测量部分的半径长度总和为 0.8 mm,获得了算术平均偏差的粗糙度 R_a 。

$$R_a = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a |h_i| \quad (2)$$

式中： h 为测量粗糙度所处半径； a 为测量次数。

粗糙度测量结果如图 11 所示。各个方向的粗糙度都很小，随着方向的变化差异不大。平均粗糙度总计 $R_a = 0.28 \mu\text{m}$ ，这证明表面通过抛光得到改善，如此小的粗糙度值对湍流粘度的增加以及由此产生的功率很小^[34]。图 12 描述了圆盘粗糙度对涡轮机的影响，即使粗糙度微小增加也会导致功率明显的增加，尽管这种影响随着粗糙度的增加而变小^[35]。Borate 和 Misa^[36] 分析了磁盘间距和表面粗糙度对电源性能的影响。他们得出结论，对于盘粗糙度和盘间间隙的最佳值，效率可以提高至少 45%。

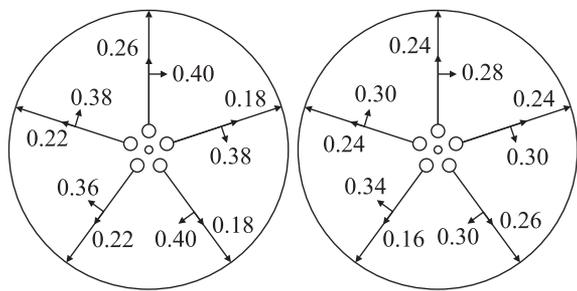


图 11 圆盘粗糙度测量结果^[34]

Fig. 11 Measurement of Disk Roughness^[34]

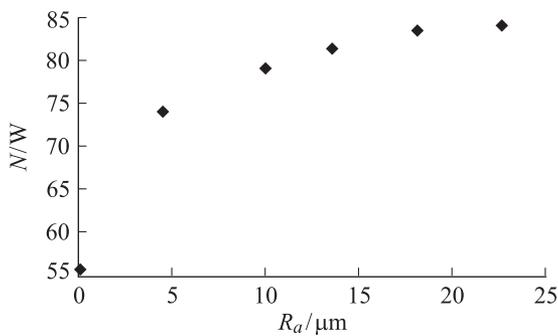


图 12 粗糙度对功率的影响^[35]

Fig. 12 Effect of Roughness on Power^[35]

4.2.3 特斯拉涡轮机圆盘厚度的影响

转子圆盘的厚度对涡轮机内部的流场流动也有影响。考虑到涡轮机的结构，圆盘厚度的增

加导致更宽的进口且使进入涡轮机的流量更高，高功率输出从而降低涡轮机的效率 η 。齐文娇^[32] 等就圆盘厚度对多通道特斯拉涡轮进行数值分析研究，得出结论：如果圆盘的厚度太大，流体进入圆盘通道会更加困难，因此流动性能变差。但盘片厚度不能太小，主要局限于其机械应力和加工问题。随着圆盘厚度的减小，圆盘的刚度迅速降低，因此机械应力增加，该应力应低于材料的许用应力。圆盘厚度较大的涡轮机壳体的等熵效率比圆盘厚度较小的涡轮机壳体的等熵效率低得多，随着圆盘厚度的增加，特斯拉涡轮机的等熵效率会有下降，这与文献中^[37] 的实验结果吻合得很好，因此盘厚度应尽可能小，同时满足材料许用应力的要求

4.2.4 特斯拉涡轮机圆盘边缘轮廓的影响

Sengupta^[38] 探究了特斯拉涡轮机转子圆盘边缘轮廓对效率的影响，研究发现，倒角（锥形尖端）减少了圆盘边缘上吸收功的剪切应力的产生，从而提高使用性能。图 13 显示了圆盘边缘倒角的效果，倒角的角度为 45 度。

齐文娇^[6] 等也对圆盘边缘的形状进行了研究。他们将圆盘的边缘形状分为矩形、三角形、半圆形、椭圆形这四种十分常见且容易加工的几何形状。如图 14 所示，各种尖部的相对高度定义为尖部高度 (h) 与盘片厚度 (t) 的比值，相对高度值越高意味着盘片越尖。作者对不同转速下盘尖涡轮模型进行了模拟，探究圆盘边缘几何形状对其流动性能影响，得出结论：在相同的转子转速下，等熵效率、扭矩系数、比功率等是尖端圆盘涡轮的高，流量系数是钝端圆盘的涡轮高；在转子进口处，钝端圆盘产生的涡流较大，堵塞流道，产生能量损失，降低流动效率，而尖端圆盘相对于切线方向的流动角小于钝端圆盘，导致更高的

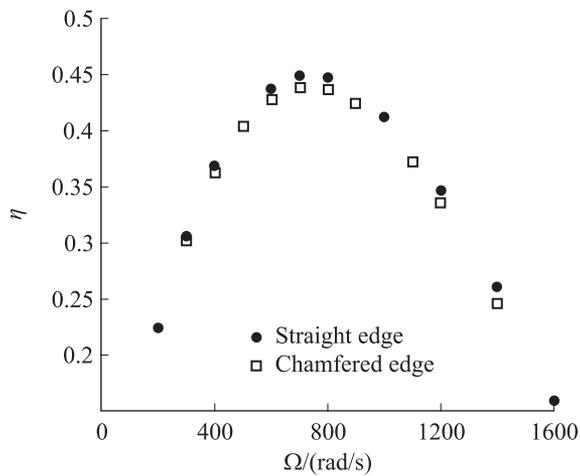


图 13 直边与倒角边工作效率 (η) 和转子转速 (Ω) 的变化情况^[38]

Fig. 13 The Working Efficiency (η) of Straight and Chamfered Edges and the Change of Rotor Speed (Ω)^[38]

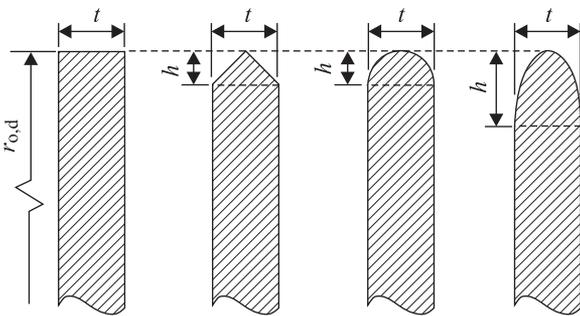


图 14 不同圆盘边缘形状的横断面图^[6]

Fig. 14 Cross-sectional View with Different Disc Edge Shapes^[6]

相对切向速度和更多的动量交换,同时在两侧的转子进口处,涡流大大减少,转子中的能量损失较小,尖端圆盘的涡轮由于涡流、低流速面积和流动角的减少,比钝端的流动状态更加平稳,导致更高的等熵效率和扭矩。对于三角形叶尖,等熵效率随着相对高度的增加而增加,并且高于钝端叶尖涡轮的增加,它随相对高度的增加而增加得更为缓慢。圆形或椭圆形叶尖在相对高度较低时流动性能表现更好,而三角形叶尖在相对高度较高时表现更好,而当圆盘尖端在径向截面为

45°时的流动状态最好。涡轮机转子圆盘边缘为尖头时,内部流场的改善随着相对高度的增加而变得更好,具体而言,圆盘通道中的流动角度减小,低流速区域减小,导致等熵效率增加。

4.3 特斯拉涡轮机的层流边界稳定性问题

研究特斯拉涡轮机的转换效率时,通常假设圆盘之间的流动状态为层流。但是,在转子圆盘高速旋转的情况下导致圆盘之间压力的变化,以上假设就不成立。因此探究特斯拉涡轮机在转子高速转动时,圆盘之间流体的流动状态和在层流状态下特斯拉涡轮机的运行情况,就十分必要。

基于以上问题, Gregory^[39]、Faller 和 Kaylor^[40]等发现在旋转系统中圆盘边界层剪切流的稳定性和结构会发生变化,在高转速的情况下,会存在两种不稳定类型。一种是由于粘性不稳定而产生,一种由于屈曲失稳而产生,两者在结构、流动方向、波长、相速度上均不相同。Rice^[41]通过建立涡轮机的数学模型,编写圆盘之间不可压缩流体流动的运动方程,导出在转子外部没有损失的情况下的涡轮效率和性能参数,然后分析运动方程和性能参数,将圆盘之间的流动状态分为以下五种:层流、回流区层流、湍流、过渡流和反向过渡流。Nendl^[42]等提出三维流场中流体存在层流稳定、层流不稳定和湍流三种状态。Moghaddam^[43]等经过实验计算验证 Nendl 提出的观点并提出粘几何数 Δ 可以充分地描述流体的流动状态,最终通过实验分析认为:粘几何数小于 10 时,流体为层流;10 ~ 20 之间时,流体为过渡流;大于 20 时,流体为湍流。过去许多研究者对特斯拉涡轮机内部空间的流场类型都进行了深入研究,特别对转子圆盘之间流体稳定性尤为重视,进行了诸多实验探究其关键性问题,但是均未得到理想的实验结果,计算流体力学分

析的结果精度也不高,因此要想得到准确的结论,还需要进一步的进行定量分析,用来判断特斯拉涡轮机在不同的工作状态下,内部圆盘之间的流动类型^[1]。

$$\Delta = \frac{\nu_r \cdot b^2}{\nu \cdot r} \quad (3)$$

式中, ν_r 为流体的动力粘度, pa; b 为圆盘间的间距, mm; ν 为流体的运动粘度, m^2/s ; r 为圆盘间空间径向坐标, mm。

4.4 工作介质对特斯拉涡轮机的影响

为了研究工作介质对特斯拉涡轮机运行时性能的影响程度, Sengupta^[44] 等利用 ANSYS 软件中的 Fluent 模块将纳米流体作为特斯拉涡轮机的工作介质, 该流体是最大体积分数为 0.05 的铁颗粒在水中的稀溶液, 对特斯拉涡轮机圆盘间隙中的纳米流体进行流体动力学分析, 发现通过适当选择几何和流动参数的组合, 纳米流体的使用会导致涡轮机功率输出的显著改善。如图 15 所示, 保持其他条件不变, 铁颗粒的体积分数从 0 增加到 0.05 时, 功率输出增加了 30% 以上, 表明了实现特斯拉涡轮机的高效率是可能的。特斯拉涡轮机中做功传递取决于圆盘表面上的粘性剪切

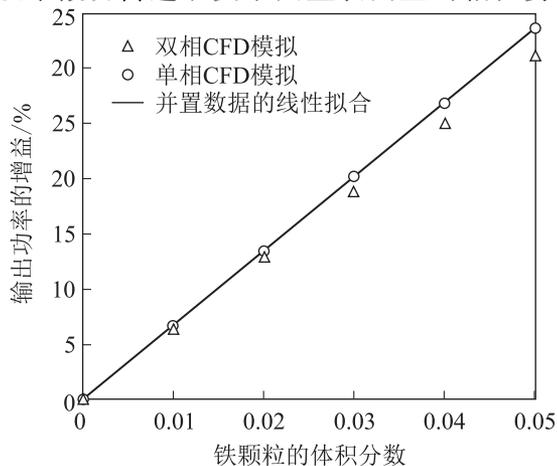


图 15 输出功率随体积分数的变化结果^[44]

Fig. 15 Output Power with Volume Fraction^[44]

力^[45], 纳米颗粒的存在增加了流体的粘性和密度, 使用纳米流体作为工作介质可以改善特斯拉圆盘涡轮机的运行性能。

5 特斯拉涡轮机在海洋能利用中的前景展望

特斯拉涡轮机能够适用于牛顿和非牛顿流体、混合流体、两相流体, 转子圆盘旋转时产生的离心力还确保了涡轮机的自清洁性质, 并且允许在肮脏的环境中正常使用, 在海水中、地热发电厂以及生物质能厂等复杂环境下有非常大的应用潜力。由文献[7]可知, 特斯拉涡轮机在低负荷运行情况下效率高, 这一突出特点也决定了特斯拉涡轮机非常适合小型装置的海洋能发电。推进基于特斯拉涡轮机的海洋能利用基础问题研究, 具有重要的理论意义和应用价值。随着人类认识和开发海洋的逐步深入, 从近岸走向远洋, 从浅水扩展至深海, 数量庞大的海洋仪器设备和传感器需要可持续的能量供给。小型海洋能装置可灵活布置, 是就近获取能量不可替代的重要选项, 有望满足海洋科学观察和采样分析的能量需求, 保证长期观测与数据积累。相对于以往多关注大规模集中发电的理论研究和工程实现, 其多级转换的机械装置在海洋环境中容易遭到破坏, 机械结构的运行维护也较为困难, 海电海用、就地取能, 为数量需求庞大, 分布广泛的海洋仪器和传感器提供简易可靠的微电源是更为迫切的现实需求。

基于特斯拉涡轮机的海洋能装置, 也为碳达峰、碳中和提供新途径。从生命周期视角对清洁能源发电装置的碳排放问题是十分有必要的。从材料选择运输, 到产品制造, 从安装运维到回收进行全生命周期分析, 均以环境友好为前提,

具有可持续发展前景;基于特斯拉涡轮机的海洋能发电装置,利用高效率的特斯拉涡轮机代替原有的涡轮机,将海洋能最终转换成电能。海洋波浪能发电装置中最常用的振荡水柱式的发电装置,上海海洋大学申请的一种结合特斯拉涡轮的振荡水柱式波浪能发电装置为基础,通过研究基础学术问题,为能源的高效利用带来新的可能,有望通过独辟蹊径取得开拓性成果,进一步拓展海洋可再生能源开发利用科学前沿。

如果针对性地对涡轮机效率问题进行探究,解决能量损失的问题,就能通过提高能量转换效率而极大地发展特斯拉涡轮机在工程实际中的应用,探究替代传统涡轮机在海洋能转换装置的可能性。在世界能源结构受环境影响和成本影响的情况下,寻找新型的能源收集方案以及改进现有的能量转换系统十分迫切,尤其在中小型功率的发电装置中,拥有巨大的潜力。在今后的可再生能源开发利用当中,微型发电领域是一个十分热门的研究领域。提高能量转换装置的效率是提高海洋能能源利用的有效措施,特斯拉涡轮机的出现是新型海洋能转换装置的潜在选择,海水中物质混杂,作为涡轮机的工作介质具有很大的腐蚀性,然而特斯拉涡轮机在复杂的海水环境中使用是没有受到影响的,可以正常使用,是替代传统的叶片式涡轮机,提高海洋能的转换效率的新型机械装置。

6 结语

本文通过阅读大量参考文献,初步介绍了特斯拉涡轮机的机械结构以及和传统涡轮机相比较所展现出的性能优点,同时比较全面地介绍了特斯拉涡轮机的国内外研究现状。随着计算流体力学以及多领域技术的蓬勃发展,特斯拉涡轮

机又重新受到关注,国内外专家学者纷纷对特斯拉涡轮机进行研究,产出了一些研究成果,使特斯拉涡轮机的应用领域逐渐扩大。在此基础上对特斯拉涡轮机的研究方法进行了汇总:包括特斯拉涡轮机数学模型的建立、计算方法的进步以及几何建模仿真。然后对影响特斯拉涡轮机运行性能的一些因素进行归纳总结,主要对喷嘴和圆盘的有关性能进行分析。包括:1)对特斯拉涡轮机的喷嘴进行增压并且保障经过喷嘴后的流体能够均匀流出,将能够提高涡轮机的运行效率;2)通过改变圆盘的几何特征使盘间隙内的流体稳定流动,分析计算还不够精确,有待进一步研究。最后对特斯拉涡轮机在海洋能利用中的应用前景进行展望。总体来说,国内外对在海洋中运行的特斯拉涡轮机的研究还不多,以海水或者液体为工质的涡轮机应用较少,目前在 ORC 技术中,以蒸汽为工质的特斯拉涡轮机作为其中膨胀机部件得到了初步使用。因此,基于现有研究成果,针对特斯拉涡轮机在海洋能利用中遇到的关键问题,从运行性能、输出功率等方面进行深入研究,不仅为研究特斯拉涡轮机在海洋能转换中提供理论基础,而且为提高涡轮机的运行效率提供理论依据和技术支持。

参考文献

- [1]彭迪,袁成清,孙玉伟. 特斯拉涡轮技术研究进展综述[J]. 舰船科学技术,2020,42(3):12-19.
PENG Di, YUAN Chengqing, SUN Yuwei. Overview of the Progress of Tesla Turbine Technology Research [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42 (3): 12-19.
- [2]KAUFUI V WONG, OMAR DE Leon. Applications of Nanofluids: Current and Future [J]. Advances

- in Mechanical Engineering, 2010, 2010 (2): 519659-519670.
- [3] 韩红彪,高善群,李济顺,等. 基于边界层理论的盘形转子流体阻力研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(10):1621-1625.
HAN Hongbiao, GAO Shanqun, LI Jishun, et al. Study on the Fluid Resistance of Disc Rotor Basedon Boundary Layer Theory [J]. Mechanical Science and Technology, 2015, 34 (10): 1621-1625.
- [4] AGRAWAL SUNIL K, GLENN G, STEPHEN P. Design and Fabrication of an Active Gravity Balanced Planar Mechanism Using Auxiliary Parallelograms [J]. Journal of Mechanical Design, 2001, 123(4):525-528.
- [5] 李锋,司春强,马进. 二氧化碳跨临界制冷系统的研究及应用进展[J]. 冷藏技术,2020,43(3): 46-52.
LI Feng, SI Chunqiang, MA Jin. Advances in the Research and Application of CO2 Cross-critical Refrigeration Systems [J]. Refrigeration Technology, 2020, 43 (3):46-52.
- [6] QI Wenjiao, DENG Qinghua, CHI Zhinan, et al. Influence of Disc Tip Geometry on the Aerodynamic Performance and Flow Characteristics of Multichannel Tesla Turbines [J]. Energies, 2019, 12(3):572-572.
- [7] SHEIKHNEJAD Y, SIMOES J, MARTINS N. Introducing Tesla Turbine to Enhance Energy Efficiency of Refrigeration Cycle [J]. Energy Rep, 2020, 6(Supl. 1):358-363.
- [8] HAN Kai, LI Jianjun, CHEN Jian, et al. Self-powered Ammonia Synthesis under Ambient Conditions via N2 Discharge Driven by Tesla Turbine Triboelectric Nanogenerators [J]. Microsyst Nanoeng, 2021(1): Article number 7.
- [9] CAREY V P. Assessment of Tesla Turbine Performance for Small Scale Rankine Combined Heat and Power Systems [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(12):122301-122308.
- [10] SONG Jian, GU Chunwei, LI Xuesong. Performance Estimation of Tesla Turbine Applied in Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC) System [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110:318-326.
- [11] HASAN A M. Investigating the Possibility of Using a Tesla Turbine as a Drive Unit for an Automotive Air-Conditioning Compressor Using CFD Modeling [J]. ASHRAE Transactions, 2016, 122:146-158.
- [12] DAMODHAR R, MRUTHYUNJAYA K N, NAVEEN, et al. Design and Fabrication of Portable Water Turbine [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017, 4(6):56-72.
- [13] LAMPART P, KOSOWSKI K, PIWOWARSKI M, et al. Design Analysis of Tesla Micro-turbine Operating on a Low-boiling Medium [J]. Polish Maritime Research, 2009, 16:28-33.
- [14] FATEMEH H, Mathew J T. Assessment of Performance of Tesla Turbine in Water Distribution Systems for Energy Harvesting [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(4):042101-042107.
- [15] 张遥. 一种用于计算机水冷系统的特斯拉涡轮散热器: 中国, CN208999934U [P/OL]. 2019-03-26. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/>

- detail. aspx? dbcode = SCPD&dbname = SCPD2019&filename = CN109521859A&uniplatform = NZKPT&v = cfbP57fuu5Qkz% 25mmd2BzpaSiHxblrsBfr R1kIRSvOCYZUHC29ThNrGHxihOh5qAVWiHrM.
- ZHANG Yao. A Tesla Turbine Heat Sink for Computer-cooled Systems, China, CN208999934U (P/OL). 2019-03-26. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2019&filename=CN109521859A&uniplatform=NZKPT&v=cfbP57fuu5Qkz%25mmd2BzpaSiHxblrsBfrR1kIRSvOCYZUHC29ThNrGHxihOh5qAVWiHrM>.
- [16] 李永国, 杜杰. 一种结合特斯拉涡轮的振荡水柱式波浪能发电装置: 中国, CN112211771A [P/OL]. 2021-01-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2021&filename=CN112211771A&uniplatform=NZKPT&v=VvlCb0nwoy76h%25mmd2Fy37cBPjsWYjLkhSgsf9XQ0LKgRlfqaqgnYCKqwxZTez2Xb0LxL>
- LI Yongguo, DU Jie. An Oscillating Water Column Wave Energy Generating Device Combined with Tesla Turbine, China, CN112211771A [P/OL]. 2021-01-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2021&filename=CN112211771A&uniplatform=NZKPT&v=VvlCb0nwoy76h%25mmd2Fy37cBPjsWYjLkhSgsf9XQ0LKgRlfqaqgnYCKqwxZTez2Xb0LxL>
- [17] MURATA S, MIYAKE Y, IEMOTO Y. A Study on a Disk Friction Pump : 1st Report, Theoretical Analysis for Flow between Corotating Disks [J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1976, 19(128):168-178.
- [18] DEAM R T, LEMMA E, MACE B, et al. On Scaling Down Turbines to Millimeter Size [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(5):052301-052309.
- [19] TALLURI L, FIASCHI D, NERI G, et al. Design and Optimization of a Tesla Turbine for ORC applications [J]. Applied Energy, 2018, 226:300-319.
- [20] HOYA G P, GUHA A. The Design of a Test Rig and Study of the Performance and Efficiency of a Tesla Disc Turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2009, 223(4):451-465.
- [21] COUTO H S, DUARTE J B F, BASTOS-NETTO D. The Tesla Turbine Revisited [R]. Sochi: 8th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, 2006.
- [22] GUHA A, SENGUPTA S. A Non-dimensional Study of the Flow through Co-rotating Discs and Performance Optimization of a Tesla Disc Turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2017, 231(8):721-738.
- [23] SENGUPTA S, GUHA A. Analytical and Computational Solutions for Three-dimensional Flow-field and Relative Pathlines for the Rotating Flow in a Tesla Disc Turbine [J]. Computers and Fluids, 2013, 88:344-353.
- [24] ENGIN T, ÖZDEMİR M, ÇESMECI Ş. Design, Testing and Two-dimensional Flow Modeling of a Multiple-disk Fan [J]. Experimental Thermal Fluid Science, 2009, 33(8):1180-1187.

- [25] NECKEL A L, GODINHO M. Influence of Geometry on the Efficiency of Convergent-Divergent Nozzles Applied to Tesla Turbines [J]. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2015, 62:131-140.
- [26] WARREN R. An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-Disk Turbines [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1965, 87(1): 29-36.
- [27] BUTENKO V A, RYLOV Y P, CHIKOV V P. Experimental Investigation of the Characteristics of Small-sized Nozzles [J]. *Fluid Dynamics*, 1977, 11(6):936-939.
- [28] MAIR W A. The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow [J]. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 1954, 58(528):375-376.
- [29] GUHA A, SMILEY B. Experiment and Analysis for an Improved Design of the Inlet and Nozzle in Tesla Disc Turbines [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2010, 224(2):261-277.
- [30] ACEVEDO T P, AMROUCHE A, CONCA. C, et al. Stokes and Navier-Stokes Equations with Navier Boundary Conditions [J]. *Journal of Differential Equations*, 2021, 285:258-320.
- [31] 丁明星. 边界层理论及其应用 [J]. *西昌师专学报(自然科学版)*, 1995(2):46-54.
DING Mingxing. The Theory of Boundary Layer and its Application [J]. *Xichang Teacher's Journal (Natural Science Edition)*, 1995(2):46-54.
- [32] QI Wenjiao, DENG Qinghua, YU Jiang, et al. Disc Thickness and Spacing Distance Impacts on Flow Characteristics of Multichannel Tesla Turbines [J]. *Energies*, 2019, 12(1):44-69.
- [33] YOVANY G, JUAN A R-N, YANHSY H, et al. Effect of Disc Spacing and Pressure Flow on a Modifiable Tesla Turbine; Experimental and Numerical Analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192:116792.
- [34] RUSIN K, WROBLEWSKI W, STROZIK M. Experimental and Numerical Investigations of Tesla Turbine [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1101(1):012029.
- [35] RUSIN K, WROBLEWSKI W, STROZIK M. Comparison of Methods for the Determination of Tesla Turbine Performance [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 57(3):563-575.
- [36] BORATE H P, MISAL N D. An Effect of Spacing and Surface Finish on the Performance of Bladeless Turbine [Z]. *Proceedings of the ASME gas turbine India conference 2012:GTINDIA2012*, Mumbai, Maharashtra, India. Mumbai (IN), 2012:165-171.
- [37] GERENDAS M, PFISTER R. Development of a Very Small Aero-Engine; *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, F, 2000* [C]. V001T04A006.
- [38] SENGUPTA S, GUHA A. Inflow-rotor Interaction in Tesla Disc Turbines; Effects of Discrete Inflows, Finite Disc Thickness, and Radial Clearance on the Fluid Dynamics and Performance of the Turbine [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2018, 232(8):971-991.

- [39] GREGORY N, STUART J, WALKER W S. On the Stability of Three-dimensional Boundary Layers with Application to the Flow due to a Rotating Disk [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990), 1955, 248 (943):155-199.
- [40] FALLER A J, KAYLOR R E. A Numerical Study of the Instability of the Laminar Ekman Boundary Layer [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1966, 23(5):466-480.
- [41] RICE W. An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-Disk Turbines [J]. Journal of Engineering for Power, 1965, 87(1):29-36.
- [42] NENDL D. Dreidimensionale Laminare Instabilitäten bei Ebenen Wänden [J]. ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1976, 56(S1):T211-T213.
- NENDL D. Three-Dimensional Laminar Instabilities in Flat Walls [J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1976, 56(S1):T211-T213.
- [43] MOGHADDAM S, RADA M, SHOOSHTARI A, et al. Evaluation of Analytical Models for Thermal Analysis and Design of Electronic Packages [J]. Microelectronics Journal, 2003, 34:223-230.
- [44] SENGUPTA S, GUHA A. Flow of a Nanofluid in the Microspacing within Co-rotating Discs of a Tesla Turbine [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(1):485-499.
- [45] GUHA A, SENGUPTA S. The Fluid Dynamics of Work Transfer in the Non-uniform Viscous Rotating Flow within a Tesla Disc Turbomachine [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(3):033601-1-27.

作者贡献说明

- 李永国:设计文章框架,补充修改引言、展望内容;
杜 杰:撰写文章初稿;
郑丁健:收集资料并分析;
覃 灿:收集资料并分析;
朱秋莹:收集资料并分析。