

特斯拉涡轮结构参数影响分析及应用前景

李永国^{1,2}, 郑丁健^{1,2}, 杜杰^{1,2}, 覃灿^{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: 相比于传统涡轮, 特斯拉涡轮具有结构简易、制造公差要求低和密封性能突出等优点, 能适应各种复杂的工作环境, 但其能量转换效率相对较低, 若能有针对性地解决能量损失问题, 特斯拉涡轮的利用效率会有大幅提高。本文综述了特斯拉涡轮的发展现状, 对涡轮喷嘴数量和结构、工作流体类型、圆盘间隙及厚度、出口半径等影响涡轮效率的因素进行了总结, 分析发现以 R245ca 为工作流体、圆盘厚度为 1 mm、盘间间隙为 0.9 mm 时特斯拉涡轮工作效率最高。同时, 针对涡轮结构特点及其应用场景, 探究了其应用于海洋能发电系统的可行性。

关键词: 特斯拉涡轮; 流体仿真; 边界层效应; 效率比; 有机朗肯循环系统

中图分类号: TK14 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.07.005

[引用本文格式] 李永国, 郑丁健, 杜杰, 等. 特斯拉涡轮结构参数影响分析及应用前景[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 34-42. LI Yong-guo, ZHENG Ding-jian, DU Jie, et al. Analysis of the influence of Tesla turbine structure parameters and its application prospects [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 34-42.

Analysis of the Influence of Tesla Turbine Structure Parameters and Its Application Prospects

LI Yong-guo^{1,2}, ZHENG Ding-jian^{1,2}, DU Jie^{1,2}, QIN Can^{1,2}

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

2. Shanghai Marine Renewable Energy Engineering Technology Research Center, Shanghai, China, Post Code: 201306)

Abstract: Compared with traditional turbines, Tesla turbine has the advantages of simple structure, low manufacturing tolerance requirements and outstanding sealing performance, which is suitable to various complex working environments. However, its energy conversion efficiency is relatively low. If the problem of energy loss can be solved, the utilization efficiency of Tesla turbine will be greatly improved. This paper reviews the development status of Tesla turbine, and furtherly summarizes the factors affecting the efficiency of Tesla turbine, such as the number and structure of turbine nozzles, the type of working fluid, disc clearance and thickness, outlet radius and so on. The analysis finds that the working efficiency of Tesla turbine is the highest when R245ca is the working fluid, disc thickness is 1 mm and disc clearance is 0.9 mm. Aiming at the structural characteristics and application prospects of turbine, the feasibility of its application in marine power generation system is explored.

Key words: Tesla turbine, fluid simulation, boundary layer effect, efficiency ratio, organic Rankine cycle system

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51876114); 上海科学技术委员会资助项目(19DZ2254800)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51876114); Project funded by Shanghai Science and Technology Commission (19DZ2254800)

作者简介: 李永国(1979-), 男, 青海西宁人, 上海海洋大学副教授。

通讯作者: 郑丁健(1998-), 男, 安徽安庆人, 上海海洋大学研究生。

引 言

特斯拉涡轮是一种类型非常独特的涡轮机,无叶片,由一系列平行的扁平圆盘组成,利用流体粘性效应传递功。这些圆盘同轴组装,每个圆盘之间保持微小间隙。由于流体需要尽可能流入转子中,所以无叶片转子定位在有一个或多个喷嘴的框架内,流体周向进入系统。

特斯拉涡轮机的工作原理是利用流体的边界层效应:流体受粘滞力影响,会在管壁或者其它物体边缘形成一层很薄的边界层。在边界层中,固定表面流体的流速为零,距表面越远速度越大。利用该效应就可以让高速流动的流体带动一组圆盘转动。因此在理想状态下其效率比普通的叶片涡轮机高得多。但目前特斯拉涡轮机能量转换效率相对较低,主要原因包括其结构特点所导致的进口和喷嘴压力损失、轴承能量损失、端盖表面流体粘性损失以及增压室中的流体耗散损失等^[1-2]。

本文介绍了当前特斯拉涡轮的研究进展及结构特点,分析了特斯拉涡轮各部件结构参数及工质对其工作效率的影响。

1 特斯拉涡轮发展现状

特斯拉涡轮在 1913 年由工程师尼古拉·特斯拉发明并获得专利,20 世纪 20~70 年代,对特斯拉涡轮机的研究向大型发电厂的应用中发展。最近,由于分布式发电的新趋势以及有机朗肯循环系统(Organic Rankine Cycle)的发展,特斯拉涡轮得到了国内外学者的广泛关注和研究^[3]。

Rice^[4]对特斯拉涡轮的 6 种不同配置进行了试验分析,并开发了转子盘内流动的分析模型。Carey^[5]改进了 Rice 建立的模型,并将其耦合到一个小规模的朗肯循环中。Lemma 等人^[6]通过研究,强调效率主要受到粘性损失的影响。Lampart 等人^[7]对直径为 32 cm 的特斯拉涡轮转子进行了全面的计算研究,预测采用 SES36 工作流体的等熵效率为 51%。由于离心力的作用,涡轮机具有自清洁特性,这使得在燃用有固体颗粒产生的非常规燃料下运行涡轮机成为可能。因此,这种无叶片涡轮机可

能非常适合在地热发电站发电^[8]。

Hadi 等人^[9]将特斯拉涡轮引入配水系统,针对智能水网络中使用无线传感器以及特斯拉涡轮小规模应用的可行性,构建了一套系统化的设计方法,以获得适用于水分配系统的特斯拉涡轮最佳参数。

季等人^[10]介绍了一种利用特斯拉涡轮将余热转化为机械能,进而输出电能的小型余热回收系统(WHR)方案,通过设计余热回收系统来验证方案的可行性。特斯拉涡轮作为该系统的核心组件,对其性能的详细研究(包括试验和计算流体力学分析)表明,其在较低转速下能够实现更高的性能。

宋等人^[11]建立了一个小型特斯拉涡轮一维模型,将该模型应用于有机朗肯循环系统中,计算其工作效率,结果表明,以 R245ca 为工质、固定温度 338.15 K,特斯拉涡轮最高效率可达 36.6%,且具有 4% 的系统热效率和 1.25 kW 的功率输出。

韩等人^[12]基于特斯拉涡轮摩擦电纳米发电机(TENG)^[13],设计了一个简单有效的 N₂放电自供电氨合成系统,研究了两种不同气路连接的特斯拉涡轮发动机的性能,提出了可控串并联方式。结果显示,与并联连接相比,每个涡轮性能得到了有效改善。这种快速且简单的氨合成方法展现出实现大规模合成应用的巨大潜力。

2 特斯拉涡轮研究方法

2.1 几何及数学模型的建立

2.1.1 几何模型

Rusin 等人^[14]对特斯拉涡轮进行了数值模拟和实验研究,实验与计算流体力学之间有较好的一致性。转子盘的直径为 73 mm,盘间间隙的厚度为 1.3 mm。转子区域包括一个圆柱形腔室①,该腔室具有两个直径为 1.8 mm 的入口孔②,直接在圆盘之间提供工作介质。该腔室直径为 6 mm,长 13 mm,与转子的垂直对称轴成 45°角。转子和外壳之间的叶尖间隙③为 0.5 mm。转子出口由 5 个直径为 7.5 mm 的孔组成,其中心距转子轴线 10 mm。工作介质从转子流到汇聚收集室④,汇聚收集室④通过 4 个圆柱形导管⑤与第 2 汇聚收集室⑥相连。通过长 20 mm、直径 13 mm 的导管⑦流到环境中。其几何模型如图 1 所示^[14]。

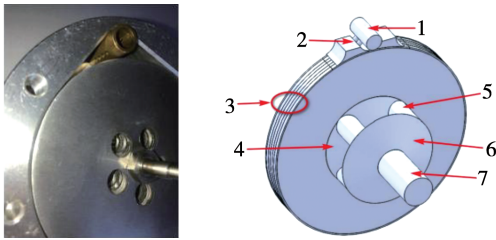


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

2.1.2 数学模型

由于流体在圆盘之间流动时温度有相当大的变化,因此需要考虑其对层流粘度值的影响。在数值模型中,粘度作为流体温度的函数,使用萨瑟兰公式确定:

$$\mu = \mu_{\text{ref}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_{\text{ref}} + T_s}{T + T_s} \tag{1}$$

式中: T_s —萨瑟兰温度; μ_{ref} —参考粘度; T_{ref} —参考温度。

其中萨瑟兰温度 $T_s = 110.4 \text{ K}$, 参考粘度 $\mu_{\text{ref}} = 1.719 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 参考温度 $T_{\text{ref}} = 273.15 \text{ K}$ 。采用 CFX 软件进行计算,该程序使用隐式有限体积格式。守恒方程为雷诺平均方程,湍流粘度的测定采用随机湍流模型^[15]。

质量、动量和能量守恒方程为:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla(\rho v) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\delta \rho v}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v \times v) = - \nabla p + \nabla \sigma \tag{3}$$

$$\frac{\delta \rho h_{\text{tot}}}{\delta t} - \frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v h_{\text{tot}}) = \nabla \cdot (v \cdot \tau) + \nabla(\lambda \cdot T) \tag{4}$$

式中: ρ —密度; σ —切向应力; h_{tot} —比焓。

数值模拟仿真采用 $k - \omega$ SST 模型^[16-17],它是 $k - \varepsilon$ 和 $k - \omega$ 模型的组合。标准的 $k - \varepsilon$ 模型虽然能够模拟远离通道壁的自由流中的湍流,但其最大的缺点是扩大了边界层中的切向应力值。 $k - \omega$ SST 模型能够正确模拟边界层中的湍流运动状态,且计算成本相对较低,因此该模型在工程计算中较为常见。

2.2 仿真模型的建立

遵循常规的计算流体动力学建模和模拟程序,

Yahya Sheikhnejad 等人^[18]在其研究中实施方法的主要步骤为:在确定好涡轮模型尺寸后相应地进行网格划分,经过网格无关性测试、边界条件的设定,迭代计算后得到数值结果。

2.2.1 网格无关性测试

为了找到一个相对最优的网格尺寸,产生可靠的结果,而且不会增加大量的计算成本,需要进行网格无关性测试。如果网格尺寸过小,计算成本将以指数速率增加。经多次仿真计算后发现,当网格数达到 364 万时,网格数的增加对输出转矩结果没有影响,所以最终网格数量设定为 364 万。表 1 为最终呈现的网格统计信息和网格质量等相关数据^[19]。

表 1 网格信息

Tab. 1 Grid information

最大偏斜度	平均偏斜度	节点数	元素数
0.890	0.343	5 947 910	3 642 217

2.2.2 网格迭代

在找到最佳网格尺寸后,生成了具有 5 个圆盘(半径 $r_0 = 50 \text{ mm}$; 圆盘间隙 $b = 1 \text{ mm}$)的非结构化网格,如图 2 所示。由于转子圆盘为完全轴对称结构,因此仅对其 1/4 部分进行网格划分。

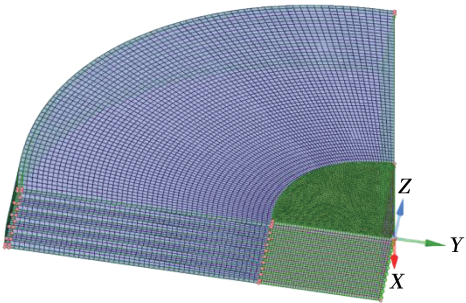


图 2 转子圆盘三维几何非结构化网格

Fig. 2 Unstructured mesh for 3D geometry of rotor disc

2.2.3 边界条件

特斯拉涡轮入口和出口部分几何形状较为复杂,设定入口和出口固定静压分别为 0.6 和 0.3 MPa,并且对固体表面采用无滑移壁面条件。圆盘部分设定为绕转子轴旋转的移动壁面,圆盘所有表面都设为绝热表面。工作流体湍流强度为 5%,湍流耗散率为 10%。

2.2.4 计算方法

采用 SIMPLEC 算法作为数值模拟迭代方法,连续性、动量、湍流动能和湍流耗散率收敛残差均设定为 1×10^{-5} 。采用二阶迎风格式作为压力、动量、能量、湍流动能和湍流耗散率的空间离散方法,选择一阶迎风格式对密度进行离散^[20]。

2.2.5 仿真结果

入口流体流速为 1.32 kg/s 的特斯拉涡轮中的流场分布,如图 3 所示。

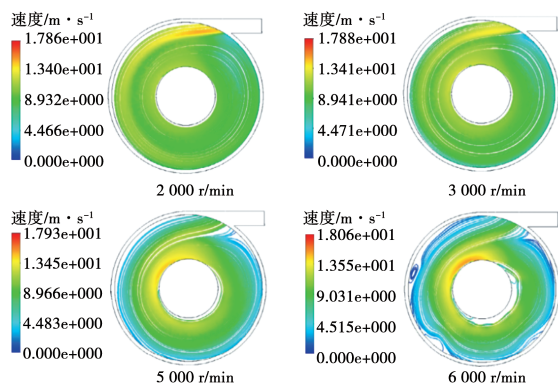


图 3 入口流速为 1.32 kg/s 时特斯拉涡轮流场分布

Fig. 3 Flow field distribution of Tesla turbine when inlet velocity is 1.32 kg/s

由图可知,在进口流量不变的情况下,转速越低,高速流体在特斯拉涡轮盘外缘的分布区域越宽,流体做功的区域就越大。当入口流量较大时,高速流体从外缘向中心逐渐流动,流体做功的区域随着转速的增加而减小^[10]。

3 特斯拉涡轮关键参数影响分析

3.1 喷嘴数量和结构研究

喷嘴是特斯拉涡轮最重要的部件之一,其数量和结构的改变对内部流体流动状况和转子速度变化影响十分显著,从而对整个涡轮工作效率产生影响。其中冲击波、过度膨胀或过度压缩等现象是造成喷嘴效率下降的主要原因^[21]。

Sengupta 等人^[22]通过改变喷嘴数量,影响流体喷射的均匀性和流入量,来验证喷嘴轴对称分布的数量对涡轮效率的影响。当喷嘴数从 2 增加到 16

时,效率峰值增加了近 2 倍,最大值出现在较低的转速条件下。如图 4 所示,喷嘴连接定子通道,定子包围着转子,定转子之间保持很小的径向间隙。入口喷嘴仅占据涡轮外侧圆周的很小一部分,约为 $2^\circ \sim 6^\circ$ 。工作流体几乎切向注入定转子之间的通道。

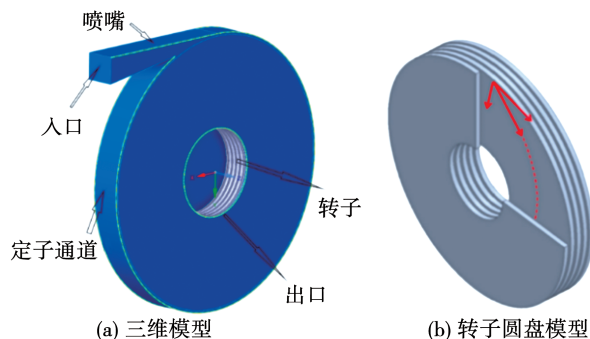


图 4 特斯拉涡轮三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of Tesla turbine

当喷嘴数量增加时,保持所有其他输入参数不变,转子进口处的流动状态变得更加均匀,有利于在切向和径向速度上达到轴对称条件,即在更大的径向位置获得对称性。轴对称条件可以通过增加喷嘴数量来实现。

Talluri 等人^[23]研究发现,喷嘴喉部的高度对定子输出端的几何形状和工作流体的质量流率变化影响较小。喉部宽度减小导致转子出口处的流量和速度线性递减,从而导致转子出口处的功率输出和动能损失减小,涡轮机效率线性增加。

3.2 工作流体的选择

工作流体经过涡轮会产生十分显著的能量和效率损失。流体首先经历压降,进一步的压力损失来自入口通道和定转子通道处的限制。然后,考虑堵塞、风阻和泵送损失的影响,这些损失除了增加熵之外,还增加了转子入口处的温度,从而导致可用功的减少。因此,选择合适的流体类型十分重要。

目前,进行了许多关于空气作为工作流体的特斯拉涡轮实验研究,但是仍然缺乏有机流体作为工作流体的研究。对于有机朗肯循环中热源和工作流体的选择,宋等人^[11]以热水作为热源,对 7 种工作流体作为工质的有机朗肯循环系统进行了热力学分

析,不同工质的热力学参数如表 2 所示。热源温度等级低,导致工作流体的蒸发温度低。蒸发温度之间的差异相对较小,而工作流体的蒸发压力和质量流量变化很大。工作流体的粘度对圆盘和工作流体之间的摩擦力有显著影响。

表 2 有机朗肯循环系统在不同工作流体下的热力学参数

Tab.2 Thermodynamic parameter of organic Rankine cycle system under different working fluids

工作流体	蒸发温度/K	蒸发压力/kPa	工作流体质量流量/kg·s ⁻¹	转子入口处的工质粘度/μPa·s
R123	343.8	383.8	0.17	11.4
R600	346.5	873.2	0.08	7.9
R600a	348.9	1230.0	0.08	8.0
R236ea	349.8	924.2	0.17	11.7
R236fa	352.1	1216.9	0.19	11.8
R245ca	345.8	469.9	0.14	15.9
R245fa	346.9	672.9	0.15	11.1

利用上述模型计算了特斯拉涡轮在各种工作流体下的效率,结果如图 5 所示。由图 5 可知,介质为 R245ca 的涡轮效率最高,达到 38.7%;R600 和 R600a 的效率相对较低,分别为 34.6% 和 34.1%。采用不同工质时特斯拉涡轮效率不同,这证实了工质性质和热力参数对涡轮性能的影响。尽管预测的效率与计算流体力学中的功率水平相似,但理论分析模型与实验结果还有一定的差距,主要原因是实验过程中径向压降以及轴承带来的能量损失。转子和涡轮机壳体之间的盘间间隙过大或过小都会导致功率和效率值降低,因为阻力小,并且工作流体在转子圆盘中没有膨胀就被吸入盘间间隙,产生能量损耗。因此,应尽量限制径向流量。

Manfrida 等人^[24]对工作流体 R245fa, R134a, SES36, 正己烷和正戊烷进行了分析。R134a 和 R245fa 作为碳氢化合物的替代品,可以使特斯拉涡轮达到很高的效率水平。SES36 是一种共沸混合物,与 R134a 和 R245fa 相比,在高温环境下具有更低的压力水平。

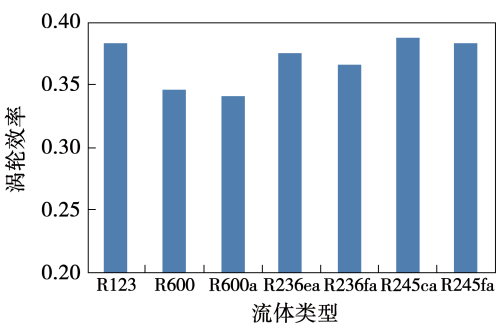


图 5 采用不同工作流体时特斯拉涡轮的效率
Fig.5 Efficiency of Tesla turbine with different working fluids

最终,经过不同温度压力条件下的实验研究对比发现,碳氢化合物更适合作为特斯拉涡轮的工作流体,正己烷在数值模拟过程中能使涡轮效率达到最高。SES36 适合高功率密度比的工作环境,因为它能产生相对较高的效率值(100℃ 情况下约 50% 效率)及创造良好发电通道(10 ~ 60 W 之间,100 ℃ 情况下)两种优势。

Sengupta 等人^[25]采用纳米流体作为工质驱动涡轮圆盘旋转,研究了纳米流体对特斯拉涡轮性能的影响。该流体是铁颗粒在水中的稀溶液(最大体积分数为 0.05),纳米颗粒的存在增加了流体的粘性和密度。特斯拉涡轮中的功传递取决于圆盘表面上的粘性剪切力,因此纳米流体能够在一定程度上提高涡轮工作效率。随着纳米颗粒体积分数的增加,径向压降增加;涡轮工作时圆盘表面上任何点的切向速度都趋于增加,径向速度几乎保持不变。通过适当选择流动参数,纳米流体的使用使得功率输出显著改善(增加幅度将取决于纳米流体体积分数的选择,样本计算显示,当纳米粒子的体积分数从 0 增加到 0.05 时,功率输出增加了 30% 以上)。此外,在不明显影响涡轮工作效率的情况下实现了输出功率的增加。

3.3 圆盘厚度及圆盘间隙

3.3.1 圆盘间隙对涡轮效率的影响

Galindo 等人^[26]分析了圆盘间距对特斯拉涡轮效率的影响,进口压力为 110.98 kPa,工作流体是压缩空气。图 6 为效率与圆盘间距的实验测量结果。

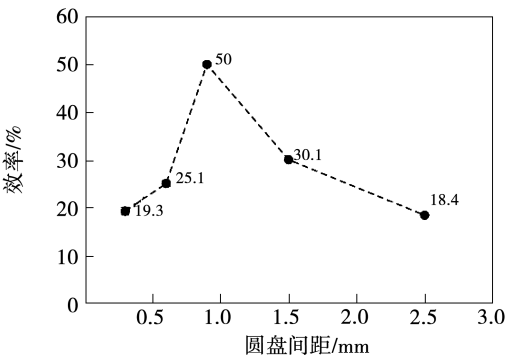


图 6 实验效率与圆盘间距的关系

Fig. 6 Relationship between experimental efficiency and disc spacing

可以看出,特斯拉涡轮效率值在 18.4% ~ 50% 范围内。值得注意的是,当圆盘间距为 0.3 和 2.5 mm 时,两者效率值相差无几。该现象可以解释为,如果圆盘间距过小,由于粘性力,流体无法进入间隙空间;当盘间距过大时,流体就会损失粘附力,其动能不能很好地传递到转子。根据计算所得结果,当圆盘间距为 0.9 mm 时,效率值最佳。不同的盘间距下流体的流动模式也不同,一般来说,效率值受速度的影响较大。

3.3.2 圆盘厚度对涡轮效率的影响

根据喷嘴几何形状的不同,特斯拉涡轮可分为两类:1 个喷嘴通道连通至 1 个圆盘通道(一对一特斯拉涡轮)和 1 个喷嘴通道连通至几个圆盘通道(一对多特斯拉涡轮)。两种特斯拉涡轮的唯一区别在于喷嘴几何形状的不同。齐等人^[27]对这两种特斯拉涡轮的气动性能和流动特性进行了研究和数值分析,结果表明,随着圆盘厚度的增加,一对一涡轮的等熵效率略有降低,而一对多涡轮的等熵效率显著降低。例如,对于盘间距均为 0.5 mm 的涡轮,随着盘厚度从 1 mm 增加到 2 mm,前者等熵效率下降不足 7%,后者等熵效率下降约 45%。

如果圆盘厚度太大,流体流入圆盘通道会更加困难,因此气动性能变差。同时,圆盘厚度不能过小,这主要局限于其机械应力和实际加工问题。随着圆盘厚度的减小,圆盘的刚度迅速降低,导致机械应力增加,该应力应低于材料的许用应力。因此,设计涡轮时,圆盘厚度的确定应考虑其气动性能

和机械应力。对于圆盘外径为 100 mm 的特斯拉涡轮,圆盘厚度不应小于 1 mm。

3.4 入射角度

在传统叶片式涡轮工作的过程中,流体与机械部件产生的摩擦一般均起到阻碍作用,但在特斯拉涡轮中摩擦却有着双重作用:一方面,摩擦增大了径向压降,从而导致工作效率下降;另一方面,这种摩擦力是驱动转子圆盘转动、带动发电机发电的驱动力。因此,为了提高涡轮输出功率,需要对流体入射角度进行研究,从而改变流体流动路径,使得效率达到最大化^[28]。

为研究影响特斯拉涡轮机内流体流动路径的因素,Sengupta 等人^[29]采用三维 CFD 流体动力学分析方法模拟并分析了相对路径特性与喷嘴角度的关系。图 7 为喷嘴入射角度在 2° ~ 10°, $C_1 = 10^\circ$, $C_2 = 5^\circ$, $C_3 = 2^\circ$ 转子出入口之间的压差和切向速度比保持恒定的情况下喷嘴对流体相对路径长度的影响。

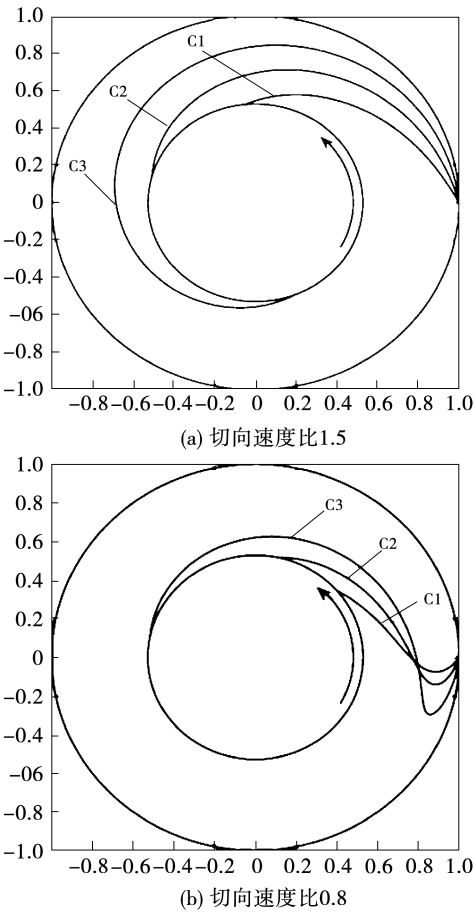


图 7 不同喷嘴角度对相对路径的影响

Fig. 7 Effect of different nozzle angles on relative path

可以看出,路径长度随着入口角度的增加而减小。其原因是随着喷嘴角度的增加,径向速度增加,切向速度减小。

4 特斯拉涡轮在有机朗肯循环系统中应用

特斯拉涡轮因其简单的结构和低成本而在小型和微型膨胀机的设计应用方面具有很大潜力,适用于小型有机朗肯循环系统。宋等人^[11]对不同工况下的有机朗肯循环系统进行了热力学分析。实验采用特斯拉涡轮的一维模型,重点研究涡轮的流动特性和动量传递。对搭载特斯拉涡轮的有机朗肯循环系统进行热力学分析,以探索在这种小规模发电系统中应用特斯拉涡轮的潜力,系统示意图如图 8 所示。

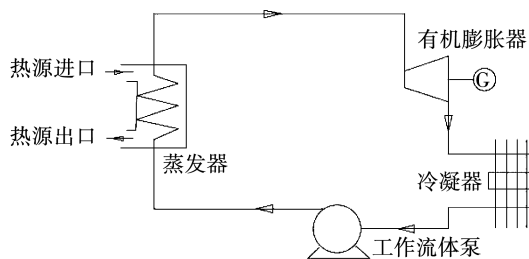


图 8 基本有机朗肯循环系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of basic ORC system

该系统由工作流体泵、蒸发器、有机膨胀器和冷凝器组成。来自冷凝器的液态有机工作流体首先被泵入蒸发器,在蒸发器中,液态有机工作流体被空气源转换成饱和或过热蒸汽,有机蒸汽在膨胀器中膨胀产生动力。之后,膨胀机排出的有机蒸汽在冷凝器中被冷却水冷凝成液体,通过工作流体泵又重新回到蒸发器,如此周而复始地循环下去。

随着蒸发温度的升高,特斯拉涡轮效率先降低后升高。当蒸发温度为 350 K 时,有机朗肯循环系统的净功率输出最高,达到 1.27 kW,系统热效率达到 4.3%。这表明,装有特斯拉涡轮的有机朗肯循环系统可以产生较大净功率输出和系统热效率。

5 特斯拉涡轮应用前景

5.1 在余热回收装置中的应用

余热回收对提高能源利用率具有重要意义。膨

胀机是余热回收中最重要的部件之一。针对特斯拉涡轮在小型余热回收系统中的可行性问题,季等人^[10]提出了一种系统化的设计方法,以寻求特斯拉涡轮应用于汽车发动机冷却剂余热回收系统的最佳参数和几何模型。当系统运行时,冷却液从发动机流入热交换器,与废气进行热交换。然后流入特斯拉涡轮,并向其输送动能。与特斯拉涡轮相连的发电机将动能转化为电能。冷却液从特斯拉涡轮流出,流入散热器,以降低其温度,从而适应发动机的工作温度。然后,通过泵使其重新进入发动机进行循环。与有机朗肯循环系统相比,该系统设备少、结构简单、噪声低。

同时,在此基础上对特斯拉涡轮的性能进行了详细的研究,其中结合了实验和计算流体动力学分析。基于综合热力学模型,对余热回收系统在不同工况下的性能进行了分析。结果表明,在低转速范围内,余热回收系统的总功率和总热效率明显提高。选择合适的工作流体并改良特斯拉涡轮结构还能进一步提高系统工作效率。

5.2 在海洋能中的应用

海洋能资源是清洁的绿色能源,且储量巨大、分布广泛^[30]。目前,海洋波浪能发电装置中的透平机应用传统的水轮机,然而受其结构特点和运行原理的限制,传统叶片式涡轮机在设计制造和应用过程中有很多技术问题需要特别考虑,如涡轮叶片具有复杂形状,需要复杂的齿轮组合等。

在高负荷功率运行情况下,叶片式涡轮机运行效率数倍于特斯拉涡轮机,而低负荷时两者的运行效率则相反^[2]。运转过程中产生的离心力使涡轮机体具有自洁性,因而能够利用含有杂质以及颗粒的浑浊海水作为工作流体驱动涡轮运转。特斯拉涡轮因其在低负载下的高运行效率成为海洋波浪能发电驱动装置的潜在选择,其可行性及后续深入研究有待进一步开展。

6 结 论

本文综述了特斯拉涡轮机的发展现状和应用前景,强调了特斯拉涡轮机对比传统涡轮机的优势所在,总结了提高涡轮工作效率所需解决的关键问题,

列举了国内外学者针对涡轮效率问题所开展的研究方法和理论体系。

但目前特斯拉涡轮的能效还是没有最大限度地发挥出来,这主要是因为喷嘴入口处及涡轮内部产生的巨大压力损失,并且工作流体的流动稳定性以及机体轴承和圆盘运行过程中的稳定性问题均有待提高。

后续有待解决的主要问题为:

(1) 特斯拉涡轮喷嘴结构的优化

喷嘴是涡轮的增压装置,也是影响涡轮性能的重要部件。影响涡轮效率的主要因素来自喷嘴处的能量损失,因此对其喷嘴结构的改良有待进一步深入研究。

(2) 边界层稳定性问题

层流边界层稳定性的降低会影响到涡轮机的整体运行效率。理论上,通常假定特斯拉涡轮盘之间流动的流体是层流。然而,当转子高速旋转导致压力下降时,这种假设就不成立了。因此,在涡轮实际运转过程中,流体状态大多为湍流。当圆盘高速旋转时,会由于粘性和屈曲失稳而导致边界层不稳定。为了找出层流和湍流理论的适用性以及转子高速运转情况下圆盘之间的流体流动状况,需要对边界层以及工作流体的稳定性进行深入研究。

如果能够通过技术改进有效地解决上述问题并控制粘性和其他能量损失,特斯拉涡轮可能会成为一个高效的发电设备。

参考文献:

- [1] MANFRIDA G, TALLURI L. Fluid dynamics assessment of the Tesla turbine rotor[J]. Thermal Science, 2019, 23 (1): 1 - 10.
- [2] 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: 12 - 19.
- [3] CIAPPI L, FIASCHI D, NIKNAM P H, et al. Computational investigation of the flow inside a Tesla turbine rotor[J]. Energy, 2019, 173: 207 - 217.
- [4] WARREN R. An analytical and experimental investigation of multiple-disk turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1965, 87 (1): 1 - 29.
- [5] 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 Transactions of the ASME, 2010, 132(12): 1 - 10.
- [6] LEMMA E, DEAM R T, TONCICH D, et al. Characterisation of a small viscous flow turbine[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 96 - 105.
- [7] 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(S): 28 - 33.
- [8] GUHA A, SENGUPTA S. The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2013, 37: 112 - 123.
- [9] HADI F, YANG H, TRAUM M J. Assessment of performance of Tesla turbine in water distribution systems for energy harvesting[J]. Journal of Energy Resources Technology Transactions of the ASME, 2021, 143(4): 1 - 17.
- [10] JI F, BAO Y, ZHOU Y, et al. Investigation on performance and implementation of Tesla turbine in engine waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 179: 326 - 338.
- [11] SONG J, GU C W, LI X S. Performance estimation of Tesla turbine applied in small scale organic Rankine cycle (ORC) system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 318 - 326.
- [12] HAN K, LUO J J, CHEN J, et al. Self-powered ammonia synthesis under ambient conditions via N_2 discharge driven by Tesla turbine triboelectric nanogenerators[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7(1): 1 - 8.
- [13] HUYNH N D, LIN Z H, CHOI D. Dynamic balanced hybridization of TENG and EMG via Tesla turbine for effectively harvesting broadband mechanical pressure[J]. Nano Energy, 2021, 85: 1 - 12.
- [14] RUSIN K, WROBLEWSKI W, SRTOZIK M. Comparison of methods for the determination of Tesla turbine performance[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 57(3): 563 - 575.
- [15] GHASEMI S E, RANJBAR A A. Numerical thermal study on effect of porous rings on performance of solar parabolic trough collector[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 807 - 816.
- [16] YOU Y, SEIBOLD F, WANG S. URANS of turbulent flow and heat transfer in divergent swirl tubes using the $k - \omega$ SST turbulence model with curvature correction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 159: 1 - 10.
- [17] RUSIN K, WROBLEWSKI W, RULIK S. The evaluation of numerical methods for determining the efficiency of Tesla turbine operation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(12): 5711 - 5721.

- [18] SHEIKHNEJAD Y, SIMÕES J, MARTINS N. Introducing Tesla turbine to enhance energy efficiency of refrigeration cycle[J]. Energy Reports, 2020(6):358–363.
- [19] ALMEIDA Á J, SHAHPARI A, VUJICIC Z, et al. Simplified model for power penalty when using PIN and APD receivers[J]. Optics Communications, 2017, 392:15–19.
- [20] AGHAGOLI A, SORIN M. CFD modelling and exergy analysis of a heat pump cycle with Tesla turbine using CO₂ as a working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178:1–12.
- [21] NECKEL A L, GODINHO M. Influence of geometry on the efficiency of convergent-divergent nozzles applied to Tesla turbines[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 62:131–140.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] MANFRIDA G, PACINI L, TALLURI L. An upgraded Tesla turbine concept for ORC applications[J]. Energy, 2018, 158:33–40.
- [25] 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.
- [26] GALINDO Y, REYES-NAVA J A, HERNÁNDEZ Y, et al. Effect of disc spacing and pressure flow on a modifiable Tesla turbine: experimental and numerical analysis[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192:1–13.
- [27] QI W J, DENG Q H, JIANG Y, et al. Disc thickness and spacing distance impacts on flow characteristics of multichannel Tesla turbines[J]. Energies, 2019, 12(1):1–25.
- [28] 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.
- [29] 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 & Fluids, 2013, 88:344–353.
- [30] 张雅洁, 赵 强, 褚温家. 海洋能发电技术发展现状及发展路线图[J]. 中国电力, 2018, 51(3):94–99.
- ZHANG Ya-jie, ZHAO Qiang, CHU Wen-jia. Development status and development roadmap of ocean energy power generation technology[J]. China Power, 2018, 51(3):94–99.

(丛 敏 编辑)