

基于NACA翼型的Savonius风力机叶型研究

陈坤辉, 陈建*, 张周周

上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年1月21日; 录用日期: 2023年2月23日; 发布日期: 2023年3月7日

摘要

阻力型垂直轴风力机由于其优越的环境适应性以及风向无关性等特征广泛运用于城市和乡村等低风速环境中。为提高阻力型垂直轴风力机的风能利用率, 本文创新性的提出一种基于NACA翼型型线的Savonius风力机, 并采用非定常数值模拟及翼型参数化研究了关键设计参数对风力机气动和流动特性的影响。结果表明: 基于NACA翼型型线设计的Savonius风力机叶型不但提升了风力机的功率系数, 还加宽了有效的工作范围; 其中3040型风力机最佳功率系数为0.2357, 高出传统Savonius风力机7.68%; 基于NACA翼型的叶型能有效改善风力机流场, 增大推动压差, 减弱叶型分离涡, 从而提高风力机的功率输出。

关键词

阻力型, 垂直轴风力机, 叶片型线, 参数化, 功率系数

Research on Blade Profile of Savonius Wind Turbine Based on NACA Airfoil

Shenhui Chen, Jian Chen*, Zhouzhou Zhang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 21st, 2023; accepted: Feb. 23rd, 2023; published: Mar. 7th, 2023

Abstract

The drag-type vertical axis wind turbine is widely used in low wind speed areas such as cities and villages due to its superior performance in complex wind environments and wind direction independent. In order to improve the wind energy utilization rate of the drag-type vertical axis wind turbine, this paper innovatively proposes a Savonius wind turbine based on NACA airfoil profile, and uses unsteady numerical simulation and airfoil parameterization to study the influence of key

*通讯作者。

design parameters on the aerodynamic and flow characteristics of the wind turbine. The unsteady numerical simulation is carried out to study the influence of design parameters on the performance of the wind turbine. The results show that the blade profile of Savonius rotor based on NACA airfoil can not only effectively improve the power coefficient of the wind turbine, but also broaden the working and operation range. The wind turbine with 3040 blade profile achieves the best power coefficient 0.2357, which is 7.68% higher than the traditional Savonius wind turbine. At the same time, the blade profile based on NACA airfoil can effectively change the flow field around the wind turbine, increase the driving pressure difference of the wind turbine, reduce the size of shedding vortex, and thus improve the power output of the wind turbine.

Keywords

Drag Type, Vertical Axis Wind Turbine, Blade Profile, Parameterization, Power Coefficient

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

建筑能源的消耗远超工业和交通部门，住宅和商业建筑的不断增长给城市可持续发展带来了新的挑战，为建筑寻求合适的可再生能源已成为近年来学者的关注热点[1]。芬兰工程师 Savonius S J [2]发明的 Savonius 阻力型垂直轴风力机由于结构简单、建造成本低、不受来流风向控制、良好的自启动能力及建筑复杂风环境适应性而被人们广泛关注[3]，但其缺点是功率系数相对较低[4]。

为提高阻力型垂直轴风力机的效率，学者们对 Savonius 风力机结构参数开展了大量的研究工作。几何参数方面，李岩等[5]研究发现叶片重叠比 0.175 时风力机性能最优。Prabowoputra D M 等[6]对不同相移角叶片的 Savonius 风力机进行了研究。王军等[7]数值模拟研究叶片数量发现了一种能提高转矩和功率的新型 Savonius 风力机。陈建等[8]实验研究发现单层叶轮的风力机能产生更大的转矩。谢晶等[9]采用数值模拟研究发现长导风帘导流装置能提高阻力型风力机的运行效率。朱建勇等[10]对 180°螺旋式 Savonius 风力机的气动特性进行了研究。赵振宙等[11]研究表明螺旋角为 180°、隔板数为 6、螺距为 6 的螺旋形 Savonius 叶轮具有较高的风能利用率。Abdelaziz K R 等[12]对改变叶片弧角的 Savonius 转子进行了研究。

叶片型线方面，韩立虎等[13]数值模拟研究了半圆形叶片风力机。Bach G [14]提出了 Bach 叶型。Roy S 等[15]研究发现的新型椭圆叶型的性能最高能提高 34.8%。Aldos [16]提出了摆动叶型能有效解决叶片回流的问题。Reupke 等[17]研究发现板条型叶型能明显增强静力矩。田文龙等人[18]研究不同扁度对传统 Savonius 风力机叶轮的影响，结果发现扁度为 0.72 时叶轮的最大功率高出传统 Savonius 叶轮 5.84%。陈榴等[1]发现相较于传统半圆型 Savonius 风力机，采用流线型翼型或扁平翼型的风力机性能更好。

上述 Savonius 风力机叶轮研究发现，叶片型线不但会引起叶轮效率的剧烈变化，同时还会改变风轮最佳几何参数组合，为此叶片型线是 Savonius 风力机优化设计的核心问题之一，也是提升 Savonius 风力机风能利用率的关键。鉴于前述文献指出扁度小、流线型叶型在风能利用率提升方面极具潜力，本文创新的提出了采用 NACA 四位数翼型上表面曲线作为 Savonius 风力机的新叶型，使其具有一定流线型和高升力特性，同时叶型的参数化有利于深入开展关键设计参数对性能影响的研究。

2. Savonius 风力机参数

本文研究对象为两叶片 Savonius 风力机，其结构示意图如图 1 所示。其主要参数包括：来流风速 V ，叶轮直径 D ，端板直径 D_0 ，重叠比 S ，转轴直径 a ，叶片转动方位角 θ 。

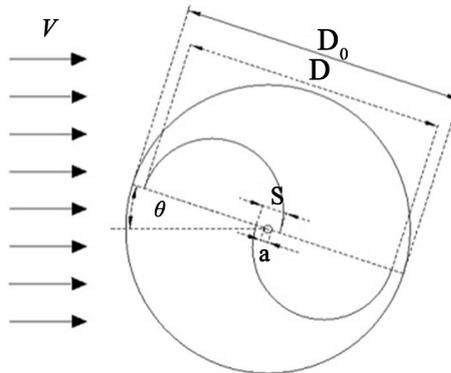


Figure 1. 2D schematic of the Savonius wind turbine
图 1. Savonius 风力机的二维示意图

3. 计算模型

3.1. 物理模型

本文采用 NACA 四位数翼型的上表面作为 Savonius 风力机的叶片型线。NACA 四位数翼型方程主要由最大弯度和最大弯度的位置控制，因此通过改变上述两个设计变量来研究 NACA 上表面曲线对 Savonius 风轮性能的影响。NACA 翼型的控制方程如下：

$$y_c = \begin{cases} \frac{m}{p^2} \left(2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right), & 0 \leq x \leq px \\ \frac{m}{(1-p)^2} \left((1-2p) + 2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right), & px \leq x \leq c \end{cases}$$

其中， c 表示翼型弦长； x 表示 $0 \sim c$ 间的点坐标； y_c 表示翼型厚度的一半； m 表示最大弯度； p 表示最大弯度的位置。本文基于 NACA 四位数翼型型线，通过 MATLAB 构造了 12 种新型 Savonius 风力机叶型，如图 2 所示。



Figure 2. The blade profiles of the wind turbine
图 2. 风力机叶型

表 1 中最左侧第二列叶型由下向上标记为 3040 (30 为最大弯度，40 为最大弯度的位置)、4040、5040 和 6040。图 2 各个叶型均与表 1 中各列一一对应。风力机的其它几何参数固定，叶轮直径 $D = 210 \text{ mm}$ ，端盖直径为 $D_0 = 231 \text{ mm}$ ，叶轮高 $H = 231 \text{ mm}$ ，中间转轴直径 a 为 6 mm ，重叠比为 0.167 。

Table 1. Parameters and names of designed blade profiles
表 1. 叶型参数和名称

m \ P	40%	50%	60%
60%	6040	6050	6060
50%	5040	5050	5060
40%	4040	4050	4060
30%	3040	3050	3060

3.2. 计算域和边界条件

由于本文研究的 Saovnius 风力机叶片轮廓沿延伸方向特征相同, 因此将风力机模型简化为二维模型再进行非定常数值模拟, 这样既能保证计算结果的可靠性, 还能大大降低计算量和计算成本[19]。为得到准确的模拟结果, 本文选取的计算区域长 $24D$ 和宽 $12D$, 叶轮中心距入口边界的长度为 $6D$, 如图 3 所示。采用滑移网格技术, 将计算域分为旋转和静止两个区域, 采用 Gambit 软件进行网格划分, 以三角形非结构网格为主, 在叶片附近采用四边形边界层网格, 并在叶片周围进行局部加密。数值模拟采用 Fluent 软件进行, 所选湍流模型为 $k-\omega$ SST, 入口边界设为速度入口, 出口设为压力出口, 叶片设为无滑移壁面, 上下边界为光滑壁面, 入口风速设为 8 m/s 。

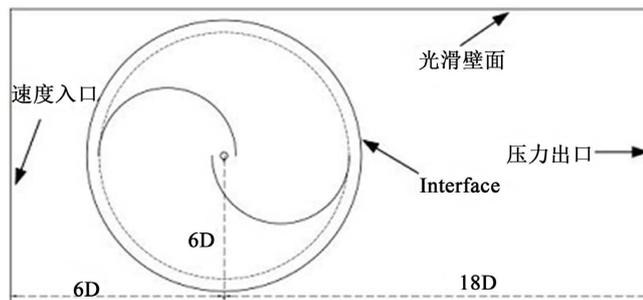


Figure 3. Computational domains and boundary conditions
图 3. 计算区域和边界条件

3.3. 数值方法验证

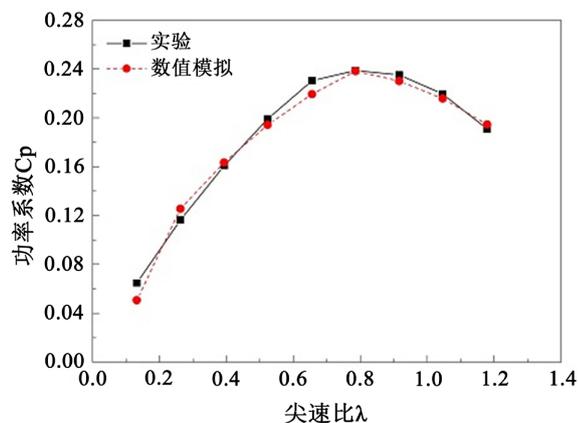


Figure 4. The validation of the turbulence model
图 4. 湍流模型验证

为验证所选计算策略的可靠性, 本文选取了传统两叶片 Savonius 风力机进行了数值模拟, 计算了不同尖速比下风力机的功率系数, 并与文献[20]实验结果进行对比, 结果如图 4 所示。由图可见, 在不同尖速比下, 数值模拟结果与实验结果基本吻合。故本文选取的计算模拟策略适用于阻力型风力机的研究, 所得出的结果具有较高的可靠性。

4. 计算结果分析

4.1. 叶轮功率特性

4.1.1. 最大弯度值的影响

图 5 给出了固定最大弯度位置(p)取值时不同最大弯度(m)对风力机性能的影响, 图中也包括了传统型风力机的功率系数 C_p 随叶尖速比 λ 变化的关系图。从图 5(a)中可以看出: 当 $p = 0.4$ 且弯度为 0.3 和 0.4 时, 风力机的功率系数较大, 且明显高于传统型 Savonius 风力机叶轮; 其中, 3040 型风力机在尖速比 λ 为 0.6 时, 取得最大功率系数为 0.2357。当弯度值超过 0.4 后, 随着弯度值的增加, 风力机的性能随之下降, 且当弯度值等于 0.6 时, 6040 型风力机效率明显低于传统 Savonius 风力机的效率。图 5(b)显示, 当 $p = 0.5$ 时, 3050、4050 和 5050 型风力机的功率系数均高于传统 Savonius 风力机; 随着弯度值的增加, 风力机的最大功率系数逐渐降低, 当弯度值为 0.6 时, 其最大功率系数明显小于传统 Savonius 风力机的最大功率系数。由图 5(c)发现, 当弯度值为 0.4 时, 4060 型风力机在尖速比 1.0 处取得最大功率系数; 当尖速比小于 0.8 时, 3060 (弯度值 0.3)、4060 (弯度值 0.4)型风力机与传统 Savonius 风力机的功率系数随尖速比变化的曲线差异很小; 但当尖速比大于 0.8 后, 3060 型和 4060 型风力机的功率系数均高于传统型风力机的功率系数。而 6060 型风力机(弯度值为 0.6)最大功率系数则明显低于传统 Savonius 风力机的功率系数。总体而言, 随着弯度的增大, Savonius 叶轮的功率系数逐渐降低。还有一点值得注意的是, 基于 NACA 翼型的风力机的工作范围均得到扩大, 且在尖速比较大时的效率要高于传统 Savonius 风力机的效率。

4.1.2. 最大弯度位置的影响

图 6 给出了在最大弯度值相同时, 最大弯度位置对功率系数的影响曲线。由图 6(a)可知, 随着最大弯度位置由 0.4 增加到 0.6, 风力机的效率逐渐降低, 但该弯度值下的风力机取得的效率均高于传统 Savonius 风力机, 且该类型的风力机在较高尖速比条件下取得较大功率系数。从图 6(b)中看出, 最大弯度位置的改变对于弯度值为 0.4 的风力机来说, 影响不大。如图 6(c)所示, 在尖速比小于 0.8 时, 弯度值为 0.5 的风力机和传统 Savonius 风力机的功率曲线无明显差异, 当超过 0.8 后, 该类型风力机取得的功率系数要高于传统型 Savonius 风力机, 且在尖速比为 1.4 时最为明显。当弯度值为 0.6 时, 该类型的风力机所获得最大功率系数明显低于传统 Savonius 风力机的最大功率系数, 仅在尖速比为 1.4 时取得相对较高的功率系数。

4.2. 气动特性分析

为了分析该类型风力机取得较高功率系数的原因, 本节对取得最大功率系数的 3040 型风力机和传统型 Savonius 风力机在尖速比 0.8 时的动态扭矩系数、流场和压力场进行了对比分析。

4.2.1. 动态扭矩系数及流动分析

图 7 为尖速比 0.8 时, 3040 型风力机和 Savonius 风力机的动态扭矩系数极坐标图。可以看出, 3040 型风力机的扭矩系数仅在小范围(120° 和 300° 附近)出现了比 Savonius 风机的扭矩系数偏小的负值, 而在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 和 $300^\circ \sim 360^\circ$ 范围内, 两者的值相差不大, 但在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 270^\circ$ 范围内均明显高出 Savonius 风力机的扭矩系数。因而, 3040 型风力机获得了更高的平均扭矩系数。

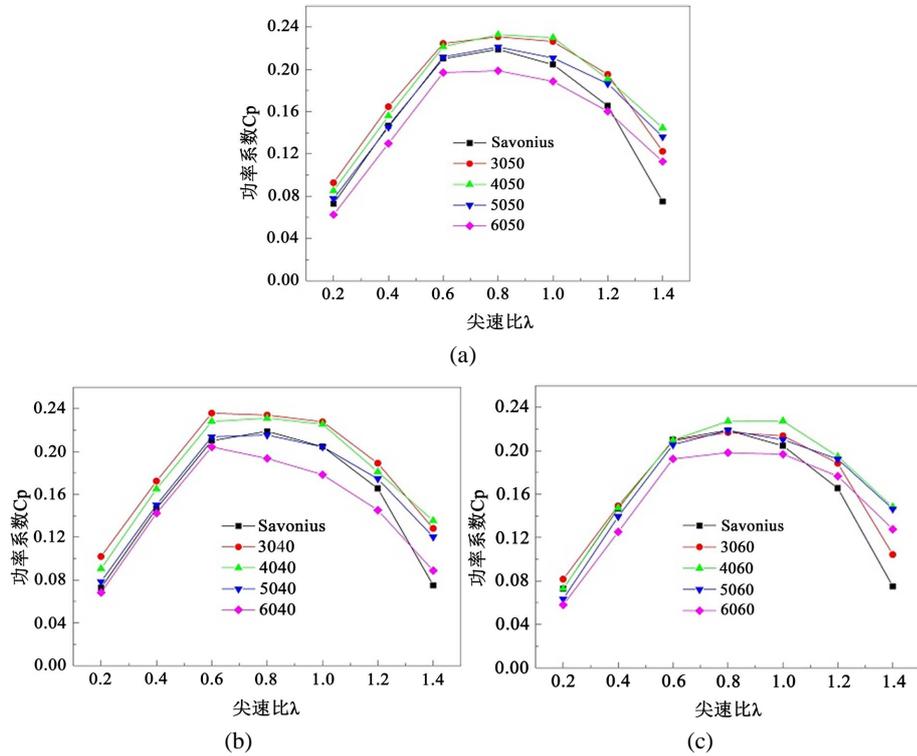


Figure 5. The effects of different camber values on the power coefficient of the wind turbine
 图 5. 不同弯度值对风力机功率系数的影响

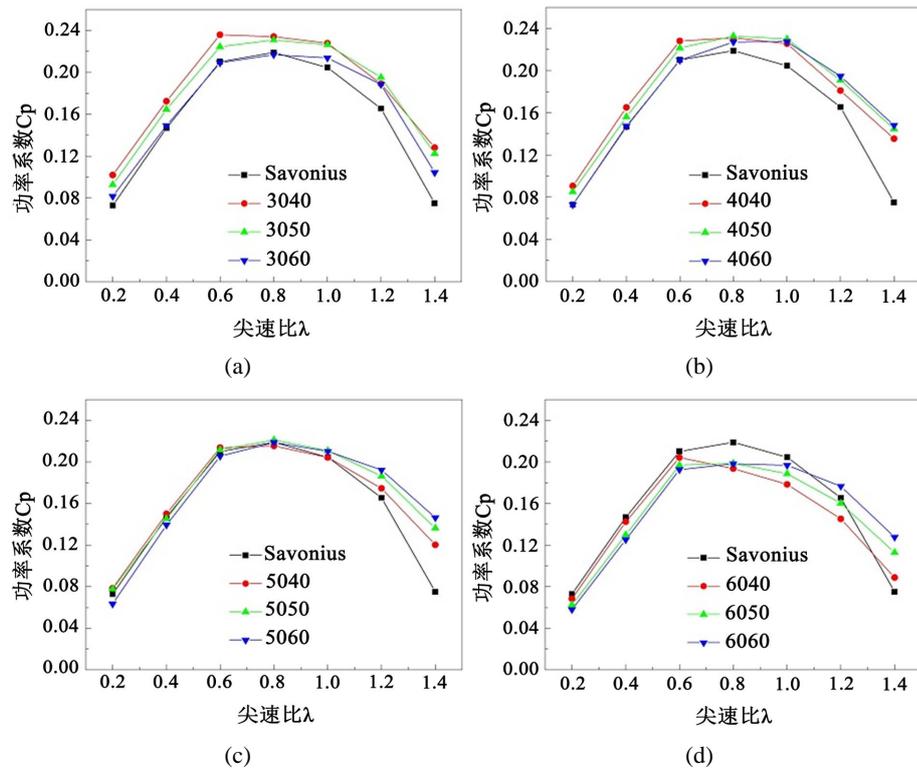


Figure 6. The effects of different camber positions on the power coefficient of the wind turbine
 图 6. 不同弯曲位置对风力机功率系数的影响

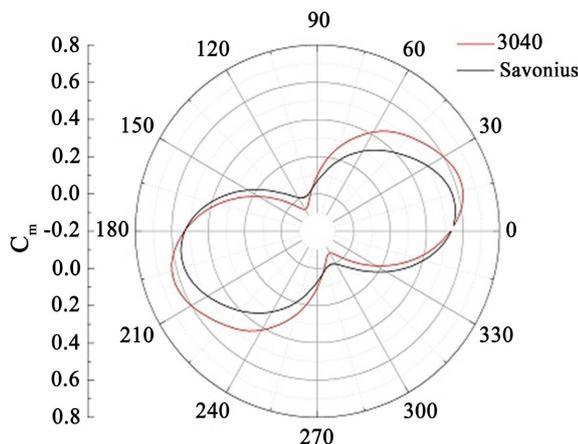


Figure 7. The polar diagram of dynamic torque coefficient
图 7. 动态扭矩系数极坐标图

流体流过风力机内部产生的较大旋涡，是影响风力机效率的原因之一[21]。故本文选取了 Savonius 风力机和 3040 型风力机在相位角 30° 时的流线图进行对比，如图 8 所示。由图可见，两者的回转叶片凹表面均产生一个较大涡旋，而后的旋涡较小；同时，前者在迎风叶片前端和回转叶片后方均出现一个明显的小涡，而后者产生的旋涡则不明显。故 3040 型风力机流场内部涡旋的减少和尾流区涡旋的改善，促进了风机的旋转，从而提高了风力机的功率输出。

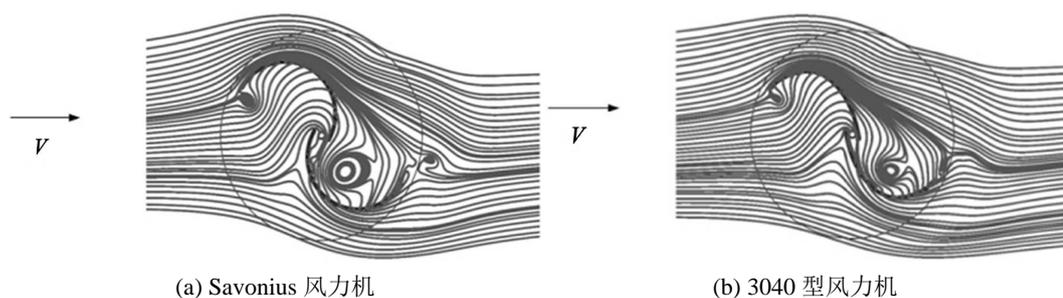


Figure 8. Streamlines of the wind turbines
图 8. 风力机流线图

4.2.2. 压力场分析

图 9 分别给出了 $\theta = 30^\circ$ 时 Savonius 和 3040 风力机的迎风叶片和回转叶片表面的压力分布曲线，其中，转轴中心为坐标原点。图 10 给出了两种风力机周围的压力分布云图。由图 9(a) 可见，两者的迎风叶片凹表面的压力分布基本相同，而 3040 型叶轮迎风叶片凸表面的压力明显小于 Savonius 叶轮，该结论与图 10 中两种风力机的压力分布相对应，即 3040 风力机叶片凸表面的附近的低压面积要大于 Savonius 风力机的低压面积。由图 9(b) 可见，3040 风力机回转叶片部分表面(距转轴中心 $-0.01 \sim -0.03$ 的区间)的压差大于 Savonius 风力机的压差，而在叶片距转轴中心 $0.03 \sim 0.10$ 的区间，其回转叶片表面的压差是较小的，这与图 10(b) 中回转叶片周围的压力分布相对应，即 3040 风力机在靠近转轴的回转叶片凸表面存在相对较高的压力分布，而在回转叶片的其他部分的压差较小，有利于风力机的转动。值得注意的是，3040 风力机回转叶片的内部无明显低压区。因此，总体导致两叶片间的推动压差增大，使得 3040 风力机在 30° 时取得较高的动态扭矩系数(见图 7)。

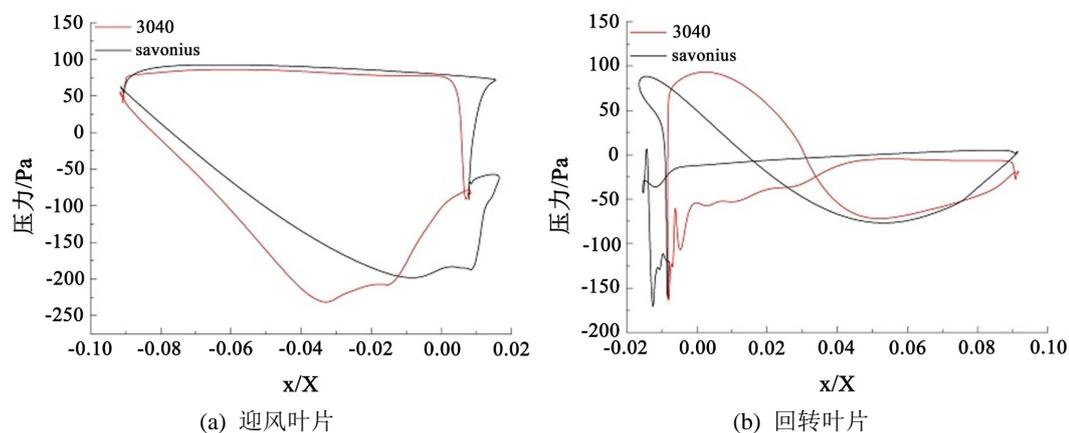


Figure 9. The distribution of pressure on the surface of Savonius and 3040 wind turbines, advanced blade (a); and returning blades (b) at $\theta = 30^\circ$

图 9. $\theta = 30^\circ$ 时 Savonius、3040 型风力机迎风叶片(a) 和回转叶片; (b) 表面的压力分布

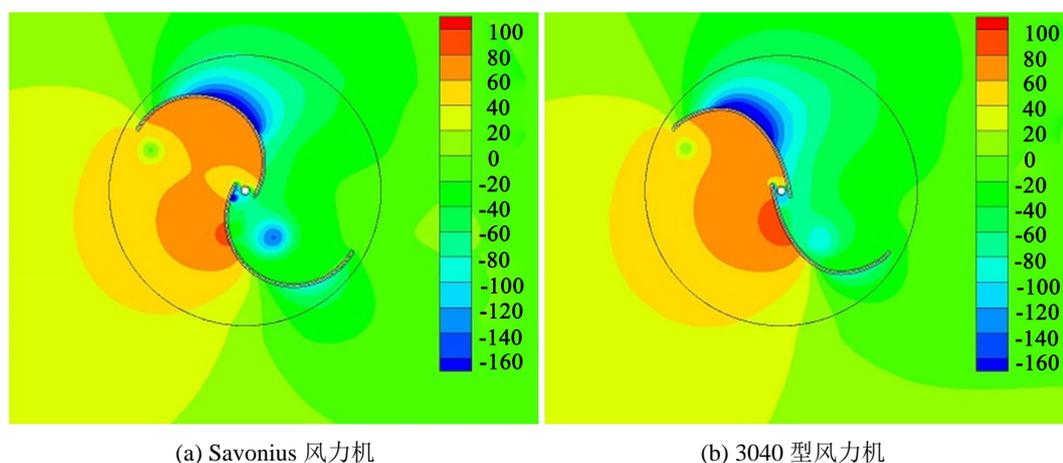


Figure 10. Pressure contours of Savonius and 3040 wind turbine at $\theta = 30^\circ$

图 10. $\theta = 30^\circ$ 时 Savonius、3040 型风力机压力分布云图

5. 结论

本文基于 NACA 翼型提出了新型 Savonius 风力机, 并采用 MATLAB 参数化和非定常数值模拟方法对不同叶片形状进行了研究分析, 结果表明:

1) 基于 NACA 翼型的 Savonius 风力机能够有效提高风力机的效率, 其中 3040 型垂直轴风力机在尖速比为 0.6 处功率系数最佳为 0.2357, 比传统 Savonius 风力机功率系数高 7.68%, 且大部分基于 NACA 翼型的 Savonius 风力机的工作尖速比范围明显加宽。

2) 相比于最大弯度位置对基于 NACA 翼型的 Savonius 风力机效率的影响, 弯度值的变化对功率系数影响较大。

3) 基于 NACA 翼型的叶型能够有效改变风力机周围的流场, 增大风力机的推动压差, 减弱叶型分离涡大小, 从而提高风力机的效率。

参考文献

- [1] Chen, L., Chen, J. and Zhang, Z. (2018) Review of the Savonius Rotor's Blade Profile and Its Performance. *Journal of*

- Renewable and Sustainable Energy*, **10**, Article ID: 013306. <https://doi.org/10.1063/1.5012024>
- [2] Savonius, S.J. (1931) The S-Rotor and Its Applications. *Mechanical Engineering*, **53**, 333-337.
- [3] Kumar, A. and Saini, R.P. (2016) Performance Parameters of Savonius Type Hydrokinetic Turbine—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **64**, 289-310. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.005>
- [4] Kamoji, M.A., Kedare, S.B. and Prabhu, S.V. (2009) Performance Tests on Helical Savonius Rotors. *Renewable Energy*, **34**, 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.002>
- [5] 李岩, 原丰, 林农. Savonius 风力机叶片重叠比的风洞实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 226-231.
- [6] Prabowoputra, D.M. and Prabowo, A.R. (2022) Effect of the Phase-Shift Angle on the Vertical Axis Savonius Wind Turbine Performance as a Renewable-Energy Harvesting Instrument. *Energy Reports*, **8**, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.092>
- [7] 王军, 仁飘零, 王兴双. 一种新型垂直轴风力机的 CFD 分析[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(1): 63-66.
- [8] Chen, J., et al. (2012) Influence of Phase-Shift and Overlap Ratio on Savonius Wind Turbine's Performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, **134**, Article ID: 011016. <https://doi.org/10.1115/1.4004980>
- [9] 谢晶, 王亚军, 罗秉东, 等. 阻力型垂直轴风力机导风帘的优化设计[J]. 电力与能源, 2012, 33(3): 256-259.
- [10] 朱建勇, 刘沛清. 180°螺旋式 Savonius 风力机气动特性试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 155-161.
- [11] 赵振宙, 郑源, 徐小韵, 等. 基于部分结构参数的螺旋形 Savonius 风轮性能优化[J]. 太阳能学报, 2010, 31(11): 1480-1484.
- [12] Abdelaziz, K.R., Nawar, M.A., Ramadan, A., Attai, Y.A. and Mohamed, M.H. (2022) Performance Investigation of a Savonius Rotor by Varying the Blade Arc Angles. *Ocean Engineering*, **260**, Article ID: 112054. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112054>
- [13] 韩立虎, 郑茂盛, 滕海鹏, 等. 阻力型垂直轴风力机气动特性的 Fluent 模拟[J]. 西北大学学报, 2013, 11(2): 1-6.
- [14] Bach, G. (1931) Untersuchungen über Savonius-Rotoren und verwandte Stromungsmaschinen. *Forsch auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, **2**, 218-231. <https://doi.org/10.1007/BF02579117>
- [15] Roy, S. and Saha, U.K. (2015) Wind Tunnel Experiments of a Newly Developed Two-Bladed Savonius-Style Wind Turbine. *Applied Energy*, **137**, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.022>
- [16] Aldos, T. (1984) Savonius Rotor Using Swinging Blades as an Augmentation System. *Wind Engineering*, **8**, 214-220.
- [17] Reupke, P. and Probert, S.D. (1991) Slatted-Blade Savonius Wind-Rotors. *Applied Energy*, **40**, 65-75. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(91\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0306-2619(91)90051-X)
- [18] 田文龙, 宋保维, 毛昭勇. 椭圆叶片 Savonius 风力机叶轮气动性能数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(32): 5796-5802.
- [19] Li, Y. and Calisal, S.M. (2010) Three-Dimensional Effects and Arm Effects on Modeling a Vertical Axis Tidal Current Turbine. *Renewable Energy*, **35**, 2325-2334. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.002>
- [20] Sanusi, A., Soeparman, S., Wahyudi, S. and Yuliati, L. (2017) Performance Analysis of a Combined Blade Savonius Wind Turbines. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, **10**, 54-62. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2017.10.1.054>
- [21] 李岩, 唐静, 田川公太朗, 冯放. 圆台型聚风罩对垂直轴风力机起动性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(4): 95-101.