

# Savonius 型风力机结构的优化设计

谢 晶, 王亚军, 黄小贤, 蔡国营, 陶 健, 武晓伟, 任若冰

(1. 福建省半导体照明工程技术研究中心; 2. 厦门大学物理与机电工程学院, 厦门 361005)

**摘 要:**对传统 Savonius 型垂直轴风力机各几何参量进行优化,在此基础上加入一种半自动阀门装置,得到的新型 Savonius 风力机,在设计风速 10 m/s 下,对其各项空气动力学性能参数进行计算。结果表明,这种风力机具有很好的开发意义,可应用于沿海地区民宅的小型风力发电,城市公共照明及景区夜景工程的离网供电。

**关键词:**垂直轴; 优化结构; 风力发电

中图分类号:TK83 文献标志码:A 文章编号:1005-7439(2009)04-0215-04

## Design on Optimizing Configuration of Savonius Rotor

XIE Jing, WANG Ya-jun, HUANG Xiao-xian, CAI Guoying, TAO Jian, WU Xiao-wei, REN Ruo-bing

(1. Fujian Semiconductor Lighting Research Center;

2. Xiamen University Institute of Physics and Electrical & Mechanical Engineering, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** This paper mainly optimized the different parameters of conventional Savonius rotor and further attempted to insert valves on the concave side of blade. The aerodynamic performance of this optimum configuration of Savonius rotor was calculated on the basis of the nominal velocity  $V = 10$  m/s. The computing results indicated that the optimum Savonius rotor could be used in these fields such as small-scale production of electricity for home use in seaboard, city public lighting and beauty spot night lighting.

**Key words:** vertical axis; optimum configuration; wind power; savonius rotor

阻力型(Savonius type)垂直轴风力机利用风轮周围的不对称气流产生侧向推力带动发电机发电,具有很多水平轴风力机无法达到的优点,如无需对风、结构简单、造价低、噪声低以及维护方便等,虽然它的风能-机械能转换效率较低,特别在运行转速较低时更低<sup>[1-3]</sup>,但是它的有效风速范围较宽,可以利用更多的风力。Savonius 型风力机对机械压力的抵抗能力大于水平轴风力机,所以水平轴风力机为防止叶片损坏在高风速下停止运转时,Savonius 型风力机还能继续运行,充分利用水平轴风力机所不能利用的那部分风能,再者它的启动性能好,能在低风速下启动,有效利用的风速范围较宽,实际效率可以得到一定补偿。根据 J. L. Menet 等人提出的 L-sigma 准则<sup>[4]</sup>,在相同受风面及施加在叶片上的最大机械压力相同的条件下,Savonius 型风力机的

单位宽度功率输出大约是水平轴风力机的 4 倍。

传统的 Savonius 型风力机主要是由两个半圆柱面形叶片构成,结构非常简单,作为一种阻力型的垂直轴风力机,主要依靠凹凸叶片上产生的阻力差驱动风轮旋转,最大风能利用系数  $C_{p,max}$  一般只能达到 0.2。本文将对传统 Savonius 型风力机的结构进行优化,寻找最佳的叶片数和几何形状包括叶轮阶数、高径比、折叠率以及端面板尺寸等几何参量,并增加一个半自动阀门装置,制成一种新型的 Savonius 风力机,希望能够改善 Savonius 型风力机的空气动力学性能,提高运行效率。

## 1 结构优化

### 1.1 叶片数目

两支叶片结构的 Savonius 型风力机比三支叶片结构具有更好的性能。这是因为三支叶片结构中桨叶之间呈  $120^\circ$ ,当风吹向叶轮时,前一支桨叶上

基金项目:福建省重大科技项目资助(No. 2006H0092)

的气流会反弹到随后一支桨叶上产生反方向的旋转,风力的能量得不到充分利用<sup>[5]</sup>,所以本案选用两叶片结构的 Savonius 型风力机,见图 1。

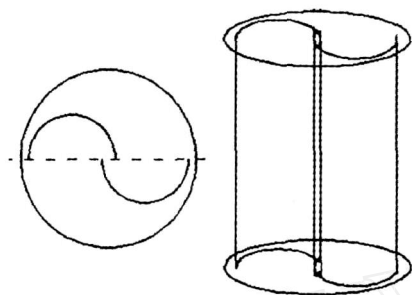


图 1 两叶片结构的 Savonius 型风力机

## 1.2 叶轮阶数

传统的一阶 Savonius 型风力机随着叶轮旋转角度的不同静态转矩变化很大,在某些角度位置风力机会出现负转矩,这种情况对 Savonius 型风力机的应用产生不利影响。在传统 Savonius 型风力机的叶轮上再增加一个叶轮得到的两层结构称为二阶的 Savonius 型风力机,两层叶轮间有 90° 相位移动,叶片数目为四支;增加为三层结构称为三阶的 Savonius 型风力机,各层间有 60° 相位移动,叶片数目为六支。增加叶轮阶数可以让风力机在更多位置处于最佳的受风面,在微风情况下的启动更为有利,在整个 360° 旋转角度中不会出现负转矩,提高了风力机的静态转矩性能。但是叶轮阶数的增加也会导致风轮惯性的增加<sup>[6]</sup>,从而使得风能利用效率下降。综合考虑所以本案选用二阶的 Savonius 型风力机。

## 1.3 叶片的几何形状

当风吹向叶轮时,对于传统的半圆柱面形叶片,所产生的最大驱动力垂直作用于叶片中心,将半圆柱面形叶片进行扭曲处理,得到的扭曲叶片的最大驱动力作用于叶片的尖端部。由于两种不同几何形状的叶片的最大驱动力的作用点不同,相对于叶轮中心的力臂也不同,扭曲叶片具有比半圆柱面形叶片更长的力臂,在最大驱动力相同情况下,扭曲叶片的正净力矩值更大,所以对叶片进行扭曲处理可以提高风力机的风能利用效率<sup>[7-8]</sup>。合适的扭曲角度很重要,因为扭曲角度过大会使叶片底部处获取的能量过分小于叶片上部,正净力矩值反而下降。本案选取最优的扭曲角度为 12.5° 将桨叶进行扭曲,如图 2 所示。在此扭曲角度下 Savonius 型风力机有最佳的风能利用效率。

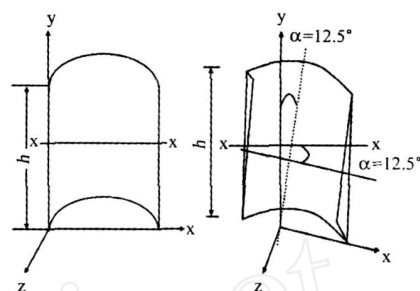


图 2 Savonius 型风力机半圆柱面和扭曲叶片示意图

## 1.4 高径比,折叠率,端面板尺寸

风轮高度  $H$  与叶片直径  $d$  的比值称为风轮高径比,如图 3 所示。高径比的大小对 Savonius 型风力机的风能利用效率有很大影响<sup>[5]</sup>,当风轮高径比取 4.0 时 Savonius 型风力机有最高的风能利用系数。因此本案的风轮高度  $H$  取 1 020 mm,叶片直径  $d$  取 255 mm。

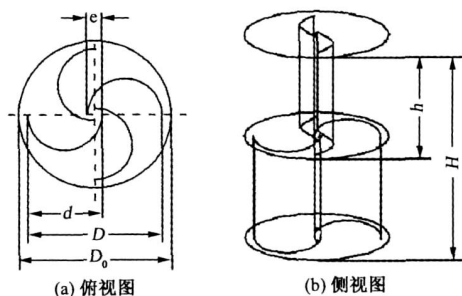


图 3 二阶 Savonius 型风力机示意图

Savonius 型风力机端面板之间可以采用中心转轴也可以不采用中心转轴,后者的风能利用系数更高<sup>[9]</sup>。对于无中心转轴结构,两桨叶之间交叠部分宽度  $e$  与桨叶直径  $d$  的比值称为折叠率,当折叠率为 1/6 时 Savonius 型风力机风能利用系数最大;由于叶片直径  $d$  确定为 255 mm,因此本案的两桨叶之间交叠部分宽度  $e$  取 42.5 mm。

本案的端面板直径比叶轮直径大 10%,目的是保证 Savonius 型风力机有较好的动力学性能<sup>[5]</sup>。

## 1.5 半自动阀门装置

在上面得出的 Savonius 型风力机的优化结构上,再加入一个半自动阀门装置,此装置可以在不影响风力机简单结构的情况下提高风能利用效率,如图 4 所示在 Savonius 型风力机的桨叶上打一个小洞,然后用一小块仿造皮贴在桨叶的凹面的洞口处,成为一个阀门装置。当桨叶的凹面是迎风面时,阀门关闭,仿造皮贴住小洞口,此时另一支桨叶就是凸面迎风,阀门打开,风通过小洞从这支桨叶的凸面流

向凹面,使凸面上阻碍旋转的气流减少,凹面上的压力增加,从而减小风轮的负转矩,改善了 Savonius 型风力机的静态转矩性能,提高了风能利用效率。此外,利用半自动阀门装置还可以减小高速对风力机的损坏。

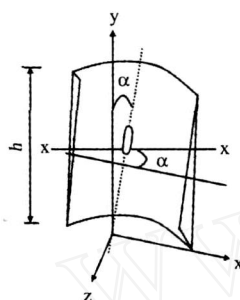
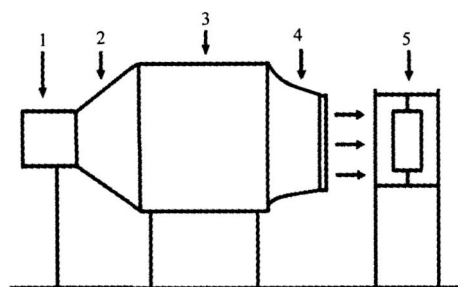


图 4 Savonius 型风力机的半自动阀门装置示意图

## 2 性能测定

新型 Savonius 风力机的性能采用自由射流型的风洞进行测试,如图 5 所示风洞收缩锥形出口的横截面积为 1 000 mm × 1 500 mm, Savonius 型风力机放置于距离空气流出口中心 750 mm 远处,风机转速采用了数字转速计(精度为 ±1 r/min)测定,风速采用热速探针风速计(精度为 ±0.1 m/s)测定,静态转矩采用制动测力计测定(风轮每旋转 15° 测量一次)。



1. 风扇区 2. 扩散区 3. 沉降室 4. 收缩锥形区  
5. Savonius 型风力机  
图 5 风洞测试示意图

图 6 给出优化的 Savonius 型风力机性能测定结果的拟合曲线。由图 6 可知,随着尖速比 的增大,新型 Savonius 风力机的风能利用系数先提高后下降,在尖速比 为 0.84 达到最大值 0.32,与传统 Savonius 型风力机的 0.2 相比有很大的提高。

优化的 Savonius 型风力机的静态转矩系数在整个 360° 的旋转角度中出现 4 个峰值,如图 7 所示,这是由新型 Savonius 风力机的二阶结构有四支叶

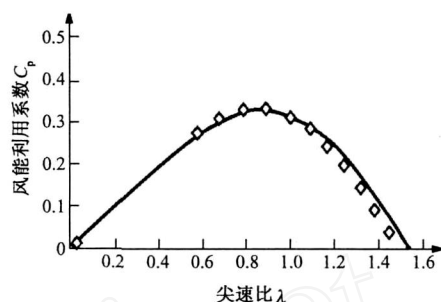


图 6 新型 Savonius 风力机的风能利用系数与尖速比关系曲线图

片所导致。从图 7 还可以看到这种风力机在任何旋转角度都没有出现负值,也就是说在任何角度风力机都能启动运转,而传统的 Savonius 型风力机由于静态转矩系数变化幅度大,在某些角度会出现负转矩而不能启动。

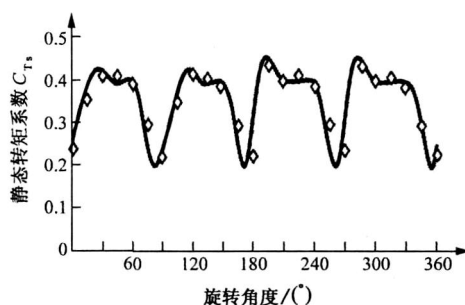


图 7 优化的 Savonius 型风力机的静态转矩性能图

## 3 新型 Savonius 风力机的运行参数

本文选择低功率小型风力机设计使用的设计风速  $V$  为 10 m/s,由于在尖速比 为 0.84 处具有最大风能利用系数 ( $C_{p,max} = 0.32$ ),并且设计的风轮高度  $H$  为 1 020 mm,叶片直径  $d$  为 255 mm,两支桨叶间交叠部分宽度  $e$  为 42.5 mm,因此在设计风速下新型 Savonius 风力机的转矩系数  $C_T$ ,输出功率  $P$ ,机械转矩  $T$  和风轮转速  $N$  可计算如下。

$$D = 2d - e = 2 \times 255 - 42.5 = 467.5 \text{ mm} \quad (1)$$

$$A = HD = 1.02 \times 0.4675 = 0.48 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$C_T = \frac{C_{p,max}}{0.84} = \frac{0.32}{0.84} = 0.38 \quad (3)$$

$$P = C_p \times \frac{1}{2} \rho A V^3 = 0.32 \times 0.5 \times 1.29 \times 0.48 \times 10^3 = 99 \text{ W} \quad (4)$$

$$T = C_T \times \frac{1}{4} \rho D A V^2 = 0.38 \times 0.25 \times 1.29 \times 0.4675 \times 0.48 \times 10^2 = 2.75 \text{ Nm} \quad (5)$$

$$N = 60 \times \frac{1}{2} = 60 \times \frac{2V}{D} \times \frac{1}{2} =$$

$$60 \times \frac{2 \times 0.84 \times 10}{0.4675} \times \frac{1}{2 \times 3.14} = 343 \text{ r/min} \quad (6)$$

式中:  $D$  为风轮直径,  $m$ ;  $A$  为风轮的扫风面积,  $m^2$ ; 为空气密度, 取  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ; 为风轮旋转的角速度,  $\text{rad/s}$ 。

## 4 结论

本文的小型 Savonius 风力机风轮高  $1\,020 \text{ mm}$ , 叶片直径  $255 \text{ mm}$ , 交叠部分宽度  $42.5 \text{ mm}$ , 风轮直径  $467.5 \text{ mm}$ , 扫风面积  $0.48 \text{ m}^2$ 。在设计风速  $10 \text{ m/s}$  下, 输出功率可达近  $100 \text{ W}$ , 有效运行的风速范围大, 机械转矩  $2.75 \text{ Nm}$ , 转速  $343 \text{ r/min}$ ; 由于风机的启动风速仅为  $2 \sim 3 \text{ m/s}$ , 而且结构简单运行操作和维护方便, 非常适合作为我国沿海地区的民宅的小型风力发电, 也可以作为风景区夜景照明的独立供电电源, 还可以充分利用大型建筑物的集风作用, 将风力机安装于大型建筑物顶层作为楼内日常用电和楼外半导体照明夜景工程的离网供电系统, 具有很好的开发意义和发展前景。

致谢: 本论文得以圆满完成, 首先要衷心的感谢导师王亚军的精心指导和大力帮助, 同时也很感谢实验室的几位同学黄小贤、蔡国营、陶健、武晓伟, 任若冰等给予我的帮助和支持。

## 参考文献:

[1] 辛士红, 汪建文. 形形色色的风力机[J]. 能源技术,

2004(4): 161 - 165.

- [2] ERIKSSON S, BERNHOFF H, LEIJON M. Evaluation of different turbine concepts for wind power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008 (12): 1419 - 1434.
- [3] SAVONIUS S J. The Savonius rotor and its application[J]. Mech Ing, 1931, 53(5): 333 - 340.
- [4] MENET J L, VALDES L C, MENART B. A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L - criterion[J]. Renewable Energy, 2001, 22: 491 - 506.
- [5] USHIYAMA I, NAGAI H. Optimum design configurations and performance of Savonius rotor[J]. Wind Energy, 1988, 12(1): 59 - 75.
- [6] KAMOJI M A, KEDARE S B, PRABHU S V. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor[J]. Energy Research, 2008, 32: 877 - 895.
- [7] SAHA U K, JAYA RAJ KUMAR M. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades[J]. Renewable Energy, 2006, 31: 1776 - 1788.
- [8] KAMOJI M A, KEDARE S B, PRABHU S V. Performance tests on helical Savonius rotors[J]. Renewable Energy, 2008(6): 02 - 04.
- [9] KAMOJI M A, KEDARE S B, PRABHU S V. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor[J]. Applied Energy, 2008(9): 19 - 21.

(上接第 214 页)

## 5 结语

核电厂退役是核电厂 5 大工作阶段(选址、建造、调试、运行、退役)之一, 其重要性已逐渐被监管部门、运营单位和公众所认识。为充分考虑工作人员和公众健康安全以及环境保护, 所有有核发电的国家, 政府对核电厂退役均给予充分重视, 并组织有关机构研发新的技术与方法。

我国目前虽然也已制定了某些放射性废物的处理与处置标准, 但是和世界上一些核工业发达相比, 还有不少差距。我国核工业发展的前景很好, 有消息透露, 我国的新能源产业发展规划中有望将核电发展目标从原定的 2020 年达到  $40 \text{ GW}$ , 扩大到建成  $70 \text{ GW}$ 、在建  $30 \text{ GW}$ , 占总装机比例达  $7\%$  左右, 也就是说未来 10 年左右的时间, 中国将建成的核电总装

机容量相当于 100 座大亚湾那样的百万千瓦级核电站。如此众多的核电站, 如果没有一套完善的退役计划和废物处理规划, 一旦出现问题后果是不可想象的, 因此, 吸收国外的丰富经验, 进一步完善我国相关的法规标准, 科学地规划发展我国的核电厂退役和废物处理相关工作, 是很有必要的, 其任务也是十分艰巨的。

## 参考文献:

- [1] PAPP R., KOMOROWSKI K. Decommissioning of Nuclear Facilities in Germany [C]// WM '02 Conference, 2002(2): 24 - 28.
- [2] Gundremmingen. KRB-a [EB/OL]. [2005-10]. <http://www.eur-decom.be/europe/pilot/ewn/initewn.html>.