DOI: 10.3901/JME.2020.08.155

180° 螺旋式 Savonius 风力机气动特性试验研究*

朱建勇^{1,2} 刘沛清²

(1. 沈阳航空航天大学航空发动机学院 沈阳 110136;

2. 北京航空航天大学流体力学教育部重点实验室 北京 100191)

摘要: 为了揭示雷诺数对 S 型风力机气动特性的影响规律以及常规 S 型风力机与 180° 螺旋式 S 型风力机气动特性的差异, 采用理论分析和风洞试验手段开展研究。基于不同雷诺数下二维凹、凸面阻力系数气动数据, 理论分析得出, 当雷诺数超过 10^4 时, S 型风力机的气动特性受雷诺数的影响较小。通过总结结构级数对 S 型风力机的影响规律, 推测出螺旋式 S 型风力机的最大风能利用系数低于常规 S 型风力机。对旋转直径 360 mm、高度 800 mm 和偏心距 100 mm 气动外形尺寸相同的常规和 180° 螺旋式 S 型风力机, 在雷诺数 $1.26 \times 10^5 \sim 2.21 \times 10^5$ 开展风洞试验验证理论分析的结论。此外, 针对螺旋式 S 型风力机, 还开展气动外形参数和在风力机端部施加端板流动控制的试验, 试验结果得出较大的长宽比和端板流动控制均能明显提高风力机的风能利用系数和拓宽较大风能利用系数对应的尖速比范围。

关键词: 风能; 螺旋式 S 型风力机; 雷诺数; 气动特性; 流动控制; 风洞试验

中图分类号: TK89

Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Helical Savonius Rotor with Twist of 180°

ZHU Jianyong^{1,2} LIU Peiqing²

(1. College of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136;

2. Key Laboratory of Fluid Mechanics, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: In order to find out the Reynolds number effect on aerodynamic characteristics for generalized Savonius wind turbine (i.e., various types of Savonius wind turbine) and aerodynamic characteristics differences between conventional Savonius wind turbine and helical Savonius wind turbine with a twist of 180°, theoretical analysis and wind tunnel test are used to carry out the research. Based on the Reynolds number effect on drag coefficients of convex and concave, the aerodynamic characteristics of generalized Savonius wind turbine is almost independent of Reynolds number when the Reynolds number exceeds 10^4 . It is also inferred that the conventional Savonius wind turbine exhibits higher maximum averaged power coefficient than the helical one, by summing up the regularity of multi-staging effect. In order to testify the results of theoretical analysis, the conventional wind turbine and the helical one with the same aerodynamic shape with the rotation diameter of 360 mm, the height of 800 mm and the overlap of 100 mm are tested in low speed wind tunnel in Reynolds number range of $1.26 \times 10^5 - 2.21 \times 10^5$. Moreover, the aerodynamic shapes effect and flow control of end plates on aerodynamic characteristics for the helical Savonius wind turbine also been are investigated, the experimental results indicate that both high aspect ratios of the wind turbine and the end plates could greatly increase the maximum averaged power coefficient and widen the range of tip speed ratios for relatively high power coefficient.

Key words: wind energy; helical Savonius wind turbine; Reynolds number; aerodynamic characteristics; flow control; wind tunnel test

0 前言

风能是一种绿色可再生能源, 利用风能是缓解

能源与环境问题的有效途径之一^[1]。常规 Savonius 风力机, 即 S 型风力机, 由两个直半圆筒叶片组成, 横截面呈“S”形, 利用半圆筒叶片凹面和凸面的阻力差做功, 是一种结构外形简单的垂直轴阻力型风力机, 尽管 S 型风力机的气动效率较低, 然而启动力矩较大, 具有优异的低风速启动特性, 通常应用在启

* 国家自然科学基金资助项目(11272034)。20190506 收到初稿, 20191228 收到修改稿

动辅助装置和微小型发电系统。利用城市风环境是未来风能利用的方向之一,因此近年来对时变风速和风向不敏感的 S 型风力机重新得到了重视。为了提高常规 S 型风力机的风能利用效率,大量的学者采用试验和数值模拟手段开展了气动外形参数(包括长宽比、重叠比、横截面外形和风轮级数等)、流动参数(包括湍流度和雷诺数等)和流动控制(端板和导流板等)对气动特性的影响^[2-3]。气动优化后的常规 S 型风力机的风能利用效率虽然得到了明显提高,然而启动阶段的静转矩与相位角密切相关,在个别相位角下静转矩甚至为负值,存在启动“死区”,另外在运行过程中转速和转矩输出波动较大,为了使得风力机运行平稳,并且转矩在所有相位角下均为正值,提出了螺旋式 S 型风力机,螺旋式 S 型风力机是 S 形截面按照一定的螺旋角沿展向扫掠而成。

相对于大量关于常规 S 型风力机的研究,对于螺旋式 S 型风力机的研究较少。ANBARSOOZ^[4]对 30° 和 45° 螺旋式 S 型风力机进行了试验和数值研究,发现螺旋式 S 型风力机的最大风能利用系数 C_p (对应尖速比 0.7) 低于常规 S 型风力机,雷诺数由 1.50×10^5 增大到 1.84×10^5 会导致最大 C_p 略微减小。RICCI 等^[5]在雷诺数 $2 \times 10^5 \sim 3.3 \times 10^5$ 范围内试验研究了 0°、90° 和 105° 螺旋式 S 型风力机的气动特性,得出风能利用系数与雷诺数无关,90° 和 105° 螺旋式 S 型风力机的 C_p 分别低于和相近于 0° 常规 S 型风力机的 C_p 。LEE 等^[6]研究了螺旋角 0°、45°、90° 和 135° 对 S 型风力机气动特性的影响,得出 45° 螺旋角取得最大的 $C_p = 0.13$, 90° 和 135° 螺旋式 S 型风力机的 C_p 低于 0° 常规 S 型风力机。当螺旋角大于 90° 后,风力机的转矩系数趋于稳定并保持不变。0° 和 45° 螺旋式 S 型风力机取得最大转矩系数,然而其对应不同的相位角。JEON 等^[7]试验研究了端板和阻塞比对 180° 螺旋式 S 型风力机气动特性的影响,在风力机顶端和底端施加与风轮旋转直径相同的圆形端板能使 C_p 提高 36%。GUPTA 数值模拟了 45° 螺旋式 S 型风力机气动性能,得出一个旋转周期内的瞬时 C_p 均为正值,通过分析切向速度分布和流线揭示瞬时 C_p 变化的原因。DAMAK 等^[8]测试了 180° 螺旋式 S 型风力机在雷诺数 $7.80 \times 10^4 \sim 1.47 \times 10^5$ 的气动特性,分析了重叠比和雷诺数的影响,得出 C_p 对雷诺数敏感,最大 C_p 及对应的尖速比随雷诺数的增大而增大,另外通过与常规 S 型风力机的比较得出,螺旋式 S 型风力机的 C_p 高于常规 S 型风力机。KAMOJI 等^[9]对 90° 螺旋式 S 型风力机进行试验研究,在试验雷诺数 $5.77 \times 10^4 \sim 2.02 \times 10^5$ 内最大 C_p 及相应的尖速比随雷诺数的增大而增大,静转矩系

数几乎不随雷诺数变化,KAMOJI 尽管对螺旋式 S 型风力机和常规 S 型风力机气动性能进行了比较,然而试验的两种类型的风力机展弦比和重叠率不一致使得不能准确判断哪类 S 型风力机气动性能的优劣。SAHA 等^[10]对三叶片的螺旋式 S 型风力机和常规 S 型风力机进行了试验研究,三叶片螺旋式 S 型风力机在运行平稳程度、气动效率和启动性能均优于常规 S 型风力机。赵振宙等^[11]利用数值模拟手段对 180° 螺旋式 S 型风力机的偏心率、端板直径、内隔板数和螺距进行了优化设计。

综上所述,目前雷诺数对于螺旋式 S 型风力机气动特性的影响规律以及螺旋式 S 型风力机与常规 S 型风力机气动特性的优劣依旧存在争议。朱建勇等^[12]试验了 180° 螺旋式 S 型风力机的 5 m/s 下的静转矩和雷诺数 2.98×10^5 下的 C_p ,得出静转矩几乎不随相位角变化,在尖速比 0.49 时最大 $C_p = 0.113$,此外转矩系数随尖速比线性减小。为了进一步弄清螺旋式 S 型风力机和常规 S 型风力机气动性能的优劣并提供更多的试验数据用于数学建模和数值方法可靠性验证,本文在相同的试验条件下对气动外形参数相同的两类风力机开展风洞试验,分析两类 S 型风力机的气动特性差异,揭示雷诺数对螺旋式 S 型风力机气动特性的规律,此外还研究了气动外形参数和端板对螺旋式 S 型风力机气动特性的影响。

1 理论分析

小型垂直轴风力机设计风速通常为 4~15 m/s,基于旋转直径的的雷诺数被限制在 10^5 左右,微型风力机对应的工作雷诺数会更低,属于典型的低雷诺数范畴^[13]。

雷诺数的影响: S 型风力机主要借助前进(半圆筒凸面)叶片和后退(半圆筒凹面)叶片的阻力差做功(图 1),半圆筒凸面与凹面的阻力系数决定了 S 型风力机的气动特性。LINDSEY^[14]研究了半圆形的阻力特性,通过改变来流与半圆形的相对位置,得到了半圆筒凸面与凹面的阻力系数(图 2),在低速条件下 ($Ma < 0.3$),当 $Ma < 0.1$ 时,凹面的阻力系数先减小,凸面的阻力系数先增大,当 $Ma > 0.1$ 时,凹面和凸面的阻力系数几乎不随马赫数的改变而改变。基于半圆形的直径,试验马赫数对应的雷诺数范围为 $7 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$,当雷诺数大于 10^4 之后,阻力系数几乎不随雷诺数而变化。尽管有限的试验数据没有测得更高雷诺数下的阻力系数,但是根据钝体绕流特性和现有阻力系数的变化趋

势可以推测得出当雷诺数大于 10^4 左右的阻力系数受雷诺数变化较小, 因此螺旋式 S 型风力机 C_p 也将几乎不随雷诺数变化, 受其影响较小。

图1 S型风力机做功示意图

图2 二维半圆筒凸面与凹面阻力系数

结构级数的影响: 早期人们为了提高静转矩特性和平滑功率输出, 将多个单级 S 型风力机沿轴向串联布置, 串联的多个单级存在相位差, 两级 S 型风力机的相位差为 90° , 三级 S 型风力机的相位差为 60° (图 3)。180°螺旋式 S 型风力机可以看成无穷极 S 型风力机, 因此可以通过分析结构级数对 S 型风力机气动特性的影响, 揭示螺旋式 S 型风力机与常规 S 型风力机气动特性的优劣。

图3 不同结构级数的 S 型风力机

KAMOJI 等^[15]试验研究了单级、两级和三级 S

型风力机性能, 当风力机总体长宽比为 1.0 和雷诺数为 8×10^4 时, 随着级数的增加(串联中的单级风力机长宽比减小), S 型风力机的 C_p 减小, 三级风力机比两级或单级风力机的静转矩波动要小。HAYASHI 等^[16]利用射流式风洞开展试验, 研究了在雷诺数 $1.4 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^5$, 旋转直径 0.33 m、高度 0.23 m 的单级和三级 S 型风力机气动特性, 单级风力机的功率峰值高于三级风力机, HAYASHI 认为这是三级风力机中每级风轮的长宽比小于单级风力机的长宽比导致的, 较小的长宽比造成较大的流动损失。通过分析结构级数对 S 型风力机的影响, 可以推测出 180°螺旋式 S 型风力机的气动特性低于常规 S 型风力机。

2 试验模型及测试装置

为了验证理论分析的结果和获取定量的试验数据, 开展了常规 S 型风力机和 180°螺旋式 S 型风力机的风洞试验。试验模型包括常规 S 型风力机和两个不同尺寸的螺旋式 S 型风力机, 螺旋式 S 型风力机 A 与常规 S 型风力机具有相同的几何尺寸, 用来对比两种型式风力机气动特性的差异; 风力机 A 和风力机 B 用来研究外形参数对螺旋式风力机的影响, 不同模型的气动外形参数见表 1。图 4 从左往右分别为常规 S 型风力机、180°螺旋式 S 型风力机和气动外形参数示意图。

表1 试验风力机气动外形参数 mm

	高度 H	旋转直径 D	叶片直径 r	偏心距 e
常规 S 型风力机	800	360	230	100
螺旋式 S 型风力机 A	800	360	230	100
螺旋式 S 型风力机 B	680	480	290	100

图4 风力机模型及气动外形示意图

风力机气动特性试验在沈航低速闭口回流式风洞中进行, 见图 5, 试验段尺寸为宽 1.2 m、高 1 m、长

3 m, 方形截面, 稳定可控风速为 4~50 m/s, 湍流度小于 0.14%。风力机 A 和风力机 B 的阻塞率分别为 24% 和 27.2%, 高于风力机风洞试验所要求的阻塞率不大于 10% 的限制要求。由于风洞尺寸有限, 如果风力机模型尺寸较小, 则工作雷诺数偏低, 与风力机现实工作雷诺数相差较大, 另外较小的模型产生的气动力较小, 不便测量。此外, KAMOJI 在雷诺数 1.2×10^5 下分别对阻塞比 20%、28% 和 35% 的常规 S 型风力机进行试验, 得出阻塞比对气动性能的影响可以忽略不计。本文重点关注的是螺旋式 S 型风力机气动特性规律, 而非完全不受洞壁干扰的精确试验数值, 因而选用较大阻塞率的风力机模型。

图 5 沈航低速风洞

3 试验方法及内容

风力机的气动特性通常用风能利用系数 C_p 和转矩系数 C_m 随尖速比 λ 的变化曲线来表征。 C_p 为风力机的功率 P 与来流风能之比, 表征风能利用效率; C_m 为 C_p 与 λ 之比, 与转矩 M 成正比, 表征风力机承受负载能力的大小; 尖速比 λ 为风力机叶尖圆周速度与来流风速 V_∞ 之比, 表征风力机旋转速度的快慢。它们的定义如下

$$P = M\omega = 2\pi nM / 60 \quad (1)$$

$$C_p = 2P / \rho A V_\infty^3 \quad (2)$$

$$C_m = C_p / \lambda \quad (3)$$

$$\lambda = \omega D / 2V_\infty \quad (4)$$

式中, ω 为旋转角速度, rad/s; n 为风力机转速, r/min; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为风力机扫掠面积, $A = HD$, m^2 。

由式(1)~(4)可知, 获取风力机的气动特性曲线, 需要在给定的不同风速 V_∞ 下, 测量得到风力机不同转速 n 对应的转矩 M 。将风力机模型置于风

洞试验段, 与风力机主轴分别连接转矩转速仪和变频电动机, 转矩转速仪采集风力机的转矩和转速, 变频电动机用来作为负载改变风力机的转速, 变频电动机在低转速下作为负载施加给风力机, 随着转速的增大, 当转矩的方向发生改变后, 电动机将不再作为负载, 而是作为动力带动风力机旋转, 因此, 在试验过程中需要注意转矩方向的改变。风力机在每个工况下运行都是相对稳定的, 瞬时转速和瞬时转矩随时间也存在波动, 通常每个工况下采集一段时间历程的转速和转矩, 通过式(1)得到功率, 通过式(2)~(4)得到相应的气动系数。

在低速流动范畴, 通过改变流速的方式改变雷诺数, 基于 S 型风力机半圆筒叶片直径 r 的雷诺数

$$Re = \rho r V_\infty / \mu \quad (5)$$

式中, μ 为动力黏性系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。试验风速选取 8~14 m/s, 对应的雷诺数为 $1.26 \times 10^5 \sim 2.21 \times 10^5$, 与小型风力机实际工作的低雷诺相近。

4 结果与分析

4.1 常规 S 型风力机与螺旋式 S 型风力机 A 比较

首先进行常规 S 型风力机和螺旋式 S 型风力机 A 运行稳定性比较, 变频电动机难以做到时均转速的精准控制, 因而选取 10 m/s 下两种风力机在某相近时均转速工况下的瞬时转速随时间变化曲线(图 6), 可以看出螺旋式 S 型风力机的转速波动幅度小, 运行更加稳定, 这与螺旋式 S 型风力机不同相位角对应相同的迎风面积密切相关。螺旋式 S 型风力机转速或转矩依然存在一定程度的波动是由于迎风面积在旋转过程中轴向移动, 靠近风力机顶端或者底端时受到尖端流动损失的影响。

图 6 不同结构型式 S 型风力机瞬时转速比较

在 10 m/s 下比较了常规 S 型风力机和螺旋式 S

型风力机 A 的气动特性, 图 7 和图 8 分别为风能利用系数 C_p 和转矩系数 C_m 随尖速比 λ 的变化曲线, 从图 7 可以看出, 两种型式风力机的 C_p 均随着 λ 的增大, 先增大后减小, 最大 λ 小于 1 进一步证实 S 型风力机属于阻力型风力机范畴。常规 S 型风力机的 C_p 峰值及其对应的尖速比分别为 0.15 和 0.75, 明显高于螺旋式 S 型风力机的 C_p 峰值 0.135 及对应的尖速比 0.64。从图 8 可以看出, 两种型式的 C_m 均随着 λ 的增大而减小, 螺旋式 S 型风力机的 C_m 随 λ 近似线性减小, 常规 S 型风力机的 C_m 在 $\lambda < 0.64$ 时近似线性变化, 并略小于螺旋式 S 型风力机的 C_m , 然而, 当 $\lambda > 0.64$ 时, 常规 S 型风力机的 C_m 明显高于螺旋式 S 型风力机, 并且随 λ 呈非线性变化。

图 7 不同结构型式 S 型风力机风能利用系数曲线比较

图 8 不同结构型式 S 型风力机转矩系数曲线比较

4.2 雷诺数对螺旋式 S 型风力机气动特性的影响

根据式(5)可知, 不同的风速对应不同的雷诺数, 图 9 分别为不同风速下螺旋式 S 型风力机 A 和风力机 B 的 C_p 随 λ 的变化曲线, 发现两种螺旋式 S 型风力机的 C_p 曲线几乎不随雷诺数变化, 即在所研究的雷诺数范围内, 雷诺数的变化对风力机性能的影响较小。图 10a、10b 分别为不同风速下螺旋式 S 型风力机 A 和风力机 B 的 C_m 随 λ 的变化曲线, 同样几乎不随雷诺数而变化。

(a) 风力机 A

(b) 风力机 B

图 9 不同雷诺数下风能利用系数曲线比较

对于前人研究得出的 S 型风力机 C_p 随雷诺数增大而增大结论, 作者认为这是由模型阻塞效应引起的, 阻塞效应会使得风力机 C_p 增大。阻塞效应除了跟阻塞比有关, 在大阻塞比下风力机转速提高会导致阻塞效应增强, 因为风力机转速越高, 表现得越像制动面, 阻止气流流经风力机的扫掠面。基于阻塞效应的影响, 前人的试验均是通过改变风速改变雷诺数, 在不同雷诺数下, 同一尖速比对应的风力机转速是不同的, 雷诺数越高, 转速越大, 因而阻塞效应越大, C_p 也就更大。

(a) 风力机 A

图10 不同雷诺数下转矩系数曲线比较

4.3 外形参数对螺旋式S型风力机气动特性的影响

由于螺旋式S型风力机的 C_p 和 C_m 在本试验研究的雷诺数范围内不随雷诺数变化,因此只比较12 m/s风速下两种气动外形尺寸的螺旋式S型风力机气动特性。图11和图12分别为不同几何尺寸下螺旋式S型风力机 C_p 和 C_m 曲线比较,长宽比 $H/D=800/360$ 更大的风力机A的 C_p 峰值高达0.135,比风力机B的 C_p 峰值高出约22.7%,此外风力机A的 C_p 峰值对应的尖速比更大,较高 C_p 对

图11 不同气动外形尺寸下风能利用系数曲线比较

图12 不同气动外形尺寸下转矩系数曲线比较

应的尖速比范围更广,风力机A在尖速比0.4~0.8均能高效地运行,更大的长宽比使得风力机尖端流动损失较小是 C_p 提高的原因。通过 C_m 比较发现,风力机A在不同尖速比 λ 的 C_m 均高于风力机B,在小尖速比下更高的 C_m 更有利于启动,此外,风力机A的 C_m 曲线斜率高于风力机B,因而,随着 λ 的增大,两种风力机的 C_m 差值逐渐增大。

4.4 端板对螺旋式S型风力机气动特性的影响

为了提高螺旋式S型风力机的气动特性,在螺旋式S型风力机的顶端和底端安装端板,端板的直径 D_0 是风力机旋转直径 D 的1.1倍。由于螺旋式S型风力机的 C_p 不随雷诺数变化,只测试在10 m/s下有端板螺旋式S型风力机的气动特性即可。

图13和图14分别为有无端板对螺旋式S型风力机 C_p 和 C_m 的影响规律曲线,可以看出,端板能够明显提高最大 C_p ,最大 C_p 提高了36.6%,另外最大 C_p 对应的尖速比由0.63增大到0.93,这主要是由于端板的存在明显减小了风力机尖端流动损失,提高了风力机的 C_p 。当尖速比超过0.37,端板使得转矩系数明显增大,并且随着尖速比的增大,有无端板对应的转矩系数增量逐渐增大。

图13 端板对螺旋式S型风力机风能利用系数的影响

图14 端板对螺旋式S型风力机转矩系数的影响

5 结论

(1) 螺旋式 S 型风力机转速和输出转矩波动较小, 运行平稳, 风能利用系数随着尖速比先增大后减小, 转矩系数随尖速比线性减小。相对于常规 S 型风力机, 螺旋式 S 型风力机最大风能利用系数及其对应的尖速比更小。

(2) 在试验雷诺数范围内 $1.26 \times 10^5 \sim 2.21 \times 10^5$, 螺旋式 S 型风力机的风能利用系数几乎不随雷诺数变化, 并利用 S 型风力机组成元素-半圆筒凸面和凹面阻力系数随雷诺数变化规律进行了解释。模型阻塞比较大使得阻塞效应增强, 风能利用系数增大, 这也是前人研究得出风能利用系数随尖速比增大而增大的潜在原因。

(3) 从气动方面考虑, 长宽比更大的螺旋式 S 型风力机由于尖端流动损失减小, 能使得风能利用系数明显提高。

(4) 在 S 型风力机顶端和底端施加 1.1 倍旋转直径的圆形端板能够明显减少尖端流动损失, 最大风能利用系数提高 36.6%。

参 考 文 献

- [1] 朱建勇, 王建明, 刘沛清. H 型风轮静转矩特性理论分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 150-156.
ZHU Jianyong, WANG Jianming, LIU Peiqing. Theoretical analysis and experimental investigation of static torque characteristic for H-darrieus wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 150-156.
- [2] ZEMAMOU M, AGGOUR M, TOUMI A. Review of savonius wind turbine design and performance[J]. Energy Procedia, 2017, 141: 383-388.
- [3] KUMAR A, SAINI R P. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine-A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 289-310.
- [4] ANBARSOOZ M. Aerodynamic performance of helical Savonius wind rotors with 30° and 45° twist angles: Experimental and numerical studies[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2016, 230(6): 523-534.
- [5] RICCI R, ROMAGNOLI R, MONTELPARE S, et al. Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems[J]. Applied Energy, 2016, 161: 143-152.
- [6] LEE J H, LEE Y T, LIM H C. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine[J]. Renewable Energy, 2016, 89: 231-244.
- [7] JEON K S, JEONG J I, PAN J K, et al. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 79(1): 167-176.
- [8] DAMAK A, DRISS Z, ABID M S. Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180° [J]. Renewable Energy, 2013, 52: 136-142.
- [9] KAMOJI M A, KEDARE S B, PRABHU S V. Performance tests on helical Savonius rotors[J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 521-529.
- [10] SAHA U K, RAJKUMAR M J. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades[J]. Renewable Energy, 2006, 31(11): 1776-1788.
- [11] 赵振宙, 郑源, 徐小韵, 等. 螺旋形 S 型垂直轴风轮结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 75-78.
ZHAO Zhenzhou, ZHENG Yuan, XU Xiaoyun, et al. Optimum figuration of helix S-type vertical axis wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 75-78.
- [12] 朱建勇, 刘沛清, 屈秋林, 等. 螺旋式 S 型风轮气动性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 1059-1067.
ZHU Jianyong, LIU Peiqing, QU Qiulin, et al. Experimental investigation on aerodynamic performance of helical Savonius rotor[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(5): 1059-1067.
- [13] ARAB A, JAVADI M, ANBARSOOZ M, et al. A numerical study on the aerodynamic performance and the self-starting characteristics of a Darrieus wind turbine considering its moment of inertia[J]. Renewable Energy, 2017, 107: 298-311.
- [14] LINDSEY W F. Drag of cylinders of simple shapes[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1938: 169-176.
- [15] KAMOJI M A, KEDARE S B, PRABHU S V. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 32(10): 877-895.
- [16] HAYASHI T, LI Y, HARA Y. Wind tunnel tests on a different phase three-stage savonius rotor[J]. JSME International Journal, 2005, 48(1): 9-16.

作者简介: 朱建勇(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为风力机、螺旋桨等旋转流体机械气动优化设计与性能分析。
E-mail: michellend@126.com
刘沛清, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为流动分离与控制, 大迎角空气动力学, 飞行器气动布局等。
E-mail: lpq@buaa.edu.cn