

马格纳斯力驱动的轮轨式风力发电机研究

刘宸宇, 李 超

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 首先比较了传统的水平轴和新型的垂直轴风力机应用的优劣势, 基于有旋圆柱绕流中涉及的库塔——儒可夫斯基定理, 将马格纳斯效应力推广应用于垂直轴风力机柱状叶片的设计之中, 提出了一种轮轨式垂直轴柱状叶片风力机的设计思想, 并建立了柱状叶片风力机的数学模型, 分析了这种新型风力机的工作原理. 初探如何合理运用现代工业形势下的新技术, 改善风力机存在的问题, 突破传统思考方式以及技术实现方式, 进一步提高这种风力机的效率和性能.

[关键词] 马格纳斯效应, 轮轨式垂直轴风力机, 风力发电, 旋转圆柱绕流

[中图分类号] TK83 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)01-0041-06

Exploration of Wheel-track Wind Turbine Driven by Magnus Force

Liu Chenyu, Li Chao

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: In this thesis, we raise an idea of the design of a wheel-track vertical axis wind turbine after presenting a contrast of the applied strengths and weaknesses between traditional HAWT and newfangled VAWT. The Magnus effect based on Kutta-Joukowski's theorem is applied to the design of the turbine blades. To realize this assumption, a concrete turbine mathematical model is set up and a detailed analysis of the performance of the blades of the newfangled wind turbine is followed. Meanwhile, several points of reflection about the research and development of this newfangled wheel-track wind turbine which can be driven by Magnus force is derived in the research process. We make a primary investigation on how to improve the efficiency and performance and avoid existing problems of this wind turbine by reasonably and effectively using the new technique under modern industry situation.

Key words: Magnus effect, wheel-track vertical axis wind turbine, wind power generation, flow past a rotating cylinder

风力机按其转动轴与地面的几何关系分为水平轴和垂直轴两大类, 在风力发电中发展迅速的是水平轴风力机, 占据了国内外风力发电的绝大部分市场. 但是水平轴风力机快速发展并没能显著减低运营成本, 风电上网电价还是居高不下, 需要靠国家的能源政策补贴才可以生存^[1]. 为了与传统能源竞争, 风力机组选择了向大型化方向的发展, 通过提高风能转换效率来降低风电成本. 但大型化发展使得水平轴风力机的成本越来越高, 就目前来看, 水平轴风力机的相对高效率以其高成本为代价^[2-5], 巨大结构尺寸几乎已经到了水平轴风力机的发展极限. 叶片材料、制造安装的成本已经严重制约着水平轴风力机的进一步大型化, 而大型化又是降低风力发电成本的最有效的途径——进入了一个悖论怪圈. 从技术方面讲, 水平轴风力机复杂的变桨和对风机构、庞大沉重的变速机构和发电机, 高耸的安装结构以及巨大叶片旋转时, 重力和惯性力的交变载荷等都制约着水平轴风力机的进一步增大.

与水平轴风力机相比, 垂直轴风力机本质上的结构设计特点使其有着诸多的优越性. 例如, 受风多向性、结构简单、安装维护成本低、受力恒定性、寿命长、易于大型化、气动噪声小、叶片污染对风轮的气动影响小等. 但垂直轴风力发电机在世界范围内却没有像水平轴风力发电机那样大规模商业化, 其主要原因是基础理论研究和研发水平相对滞后, 风能利用系数还低于水平轴等, 这已成为垂直轴风力机发展的障碍. 但是, 随着技术的不断进步和水平轴风力发电机在大型化发展中技术瓶颈的凸显, 垂直轴风力机的研

究和应用已重新受到关注^[2].

在风力发电技术的发展历史上,出现过一种基于马格纳斯(Magnus)效应的垂直轴升力型风力机的设想.设想为一列“火车”,每辆车上安装有垂直的旋转圆柱,车辆可沿环形轨道运行,每个圆柱由电动机驱动旋转.绕旋转圆柱产生垂直于流动方向的升力,该升力也垂直于圆柱的中心轴线. Magnus 转子设计原理基于 Magnus 效应, Magnus 效应驱动车辆在环形轨道上运行并驱动与车轴连接发电机.

但该风力发电装置并没有取得大规模发电的效果.早期,研究者给出的结论是:过于复杂的机械装置消耗了过多的能量^[6].例如,为了使圆柱转子上产生的升力能够持续驱动小车在环形轨道上往复运动,旋转圆柱必须在每一个上风口圆弧与下风口圆弧的结合点改变一次旋转方向,在当时的技术条件下,改变转子圆柱的转速和转向只能借助复杂的机械系统实现,机械损失过大.同样由于换向困难以及其他配套技术的影响,转子转速的提高受到很大限制,其转子的空气动力特性得不到充分发挥,加上车体轨道摩擦阻力损失,致使该种风力机的运行效率不如发展迅速的水平轴风力机高而被放弃了进一步研究.

随着科学技术的发展,诸多复杂的传统机械问题已经被传感器技术、计算机控制技术、变频和伺服电动机等技术所革新换代,使上述 Magnus 风力机所遇到的实现难点逐渐弱化,并有重新使 Magnus 风力发电机从设想变成理论与现实的双重可能.本文就对这种基于 Magnus 力驱动的轮轨式风力机进行新的探索性研究,希望能重新认识和发掘其技术潜力.

1 基于 Magnus 力驱动的轮轨式风力机

1.1 马达拉斯(Madaras)实验方案

1933 年 Madaras 在美国建造了基于 Magnus 效应的风力机大型实验方案^[7].图 1 是基于 Magnus 效应的 Madaras 转子垂直轴风力机示意图,图中的小车安放在环形铺设的钢轨上,小车的车轮直接通过车轴与发电机连接.实验中建造了直径 8.5 m、高 27.4 m 的旋转圆柱,小车上的转子由电动机驱动以产生 Magnus 效应,且转子需要在小车沿环形轨道运行一周的范围内两次改变转动方向,以使小车获得连续环形运动所需的 Magnus 驱动力.学者认为该实验方案失败的原因为其机械的复杂性.转子圆柱体的旋转方向改变会损失可观的能量,转子的启动和达速需要的大扭矩,只能通过普通电动机和减速器完成,较大的减速比又会使转子只能达到低效的气动效果.另外还有一些轨道载荷高及倾覆力矩大、近地面处风速低等原因.

1.2 对基于 Magnus 力驱动的轮轨式风力机的几点思考

1.2.1 垂直轴轮轨式风力机的优点

实际上,这种基于 Magnus 力驱动的垂直轴轮轨式风力机与水平轴风力机相比有如下所述突出的优点.其一,可以利用小车在环形轨道上运行的线速度,以车轮的转动直接带动单个发电机发电.这种分布式的发电模式已在近几年的地铁和高铁列车刹车时电力反向回馈电网技术中广泛应用,已是成熟技术,而在风力机上应用的优点更体现在可以省去一般风力机中心轴转动时需要的庞大笨重的变速机构和发电机.发电机由集中式大型机变成分布式小型机也能降低其制造和安装成本,并能在总体上提高工作可靠性.其二,可以根据风场的实际风速实时调整参与发电的分布式发电机数量,使风力机在小风速情况下也能保持稳定的运行状态,避免出现水平轴风力机低风速下无法运行的情况发生.其三,该类风力机适合于大型化,且不会由此增加技术难度和安装维修难度.

1.2.2 实验失败的技术原因

根据研究资料的结论,导致前文所述实验失败的原因在于其机械的复杂性.上世纪初,自动化技术还处在须使用机械构造来实现顺序动作的阶段,还未出现计算机控制技术、电动机变频和伺服技术以及一系列的传感器控制技术.因此,上述风力机转子的驱动和换向问题就只能靠机械系统来完成,其工作时的效率和对能量的消耗是造成实验失败的主要原因,而目前这些问题可以通过辅助一系列现代自动控制技术

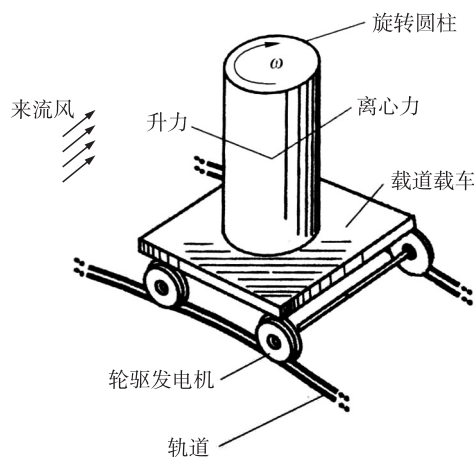


图 1 应用 Magnus 效应发电的 Madaras 概念

Fig. 1 Madaras concept of generating electricity using Magnus effect

来实现,在大大简化机械结构的同时,提高响应速度和可靠性,并可大幅度地降低电力的耗损。例如,硕大的升力转子具有较大转动惯量的基本特性,在转子的每个换向点后,其速度从零启动到指定转速需要较大的输入转矩。于是驱动转子的恒速电机功率与减速器减速比的选取形成了一对矛盾:采用大功率小减速比可以提高转子的最高转速,达到较好的转子气动性能,但电动机的体积、造价及耗电量会增高。采用较小功率电动机和大减速比减速机可以减少电动机额定功率、造价和电力消耗,但转子的最终转速低,导致转子的“气动效率差”,产生不了最大的 Magnus。另外,转子换向前后的能量回收和再利用也是一个纯机械系统难以高效实现的问题。而这些技术问题均已经可以在现代电机变频和伺服技术及计算机控制技术的辅助下得以很好地解决。

1.2.3 垂直轴轮轨式风力机实用化

通过进一步研究相关的理论并对技术问题进行了初步探讨后,我们认为这种垂直轴轮轨式风力机完全有可能发展成实用化技术,这也是下文中探讨的问题。

从风力机发展的历史看,水平轴风力机的发展速度远远超过垂直轴风力机的主要原因是前者的叶片均为升力型,垂直轴风力机叶片有升力型和阻力型两种类型。根据贝茨理论,升力型风力机的理论能量利用率为 59.3%,而阻力型仅为 19%~40%。水平轴风力机由于其运行时可达 4~6 倍或更高的叶尖速比,叶片气动性能得以较好的发挥,实际能量利用率一般可达 40%~45%。而垂直轴风力机难以精确地理论计算,有学者认为升力型垂直轴风力机(如达里厄型)的实际风能利用率应与水平轴相同。早在 1987 年,著名学者 Musgrove 就指出:广泛的实验和理论研究显示,垂直轴风力机可以与当代最好的水平轴风力机相比。这意味着如果在垂直轴风力机上投入足够的研究与资金,它会具有比水平轴风力机更为广泛的发展空间^[8]。

Magnus 力驱动的轮轨式垂直轴风力机属于升力型风力机,虽然未得到深入的理论研究,但理论上贝茨理论适用于升力型风力机,应可以获得与水平轴风力机相当的风能利用率,技术关键是如何使转子叶片获得理想的气动性能。

2 轮轨式风力机的驱动原理及技术特征

2.1 Magnus 风力机数学模型

风力机采用柱状叶片代替传统的风机翼型,柱状叶片在风场中绕其轴线旋转,使其圆周方向上产生升力,驱动风力机旋转发电。更具体的技术过程是柱状叶片的旋转运动通过电机驱动,由于叶片的旋转和风场的作用,使得叶片一侧的压力增大,另一侧的压力减小,导致叶片在圆周方向出现压力差,形成升力,进而驱动风力机开始旋转,取得和传统的升力型风力机利用翼型的复杂曲面产生压差的同等效果。

Magnus 效应阐述的是一种十分复杂的非定常流动,涉及了非定常边界的分离、旋涡的产生与释放、非对称的尾涡等一系列复杂的流动现象。它的实质是由于圆柱的旋转运动,破坏了原来对称的流场空间,使得圆柱某一侧流体流动边界分离和旋涡释放的过程受到减弱和抑制,但是加强和促进另一侧的流动过程,形成在垂直来流方向上的不对称流场空间,从而产生作用在圆柱上的升力^[9],如图 2 所示。

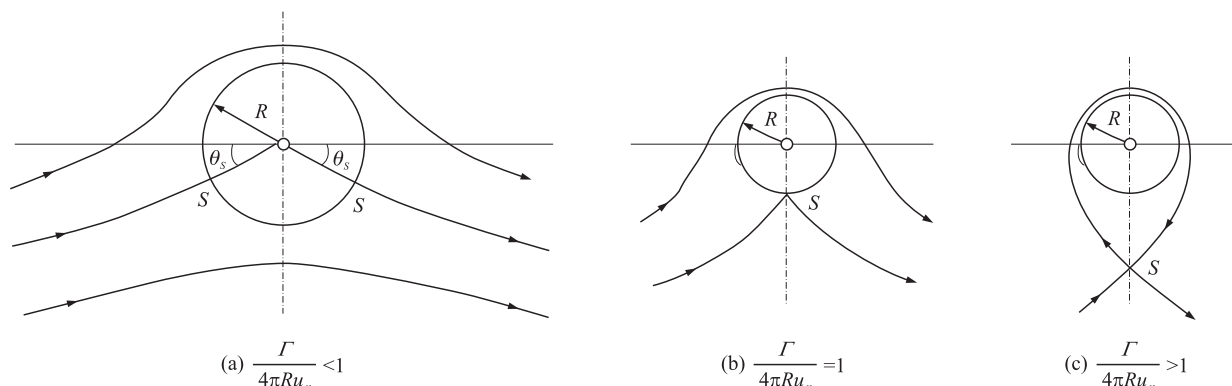


图 2 有旋圆柱绕流中圆柱前后两驻点位置随环量速度变化而变化情况

Fig. 2 The change of the position of two stationary points before and after the cylinder in the flow around a rotating cylinder with the change of the velocity of the circulation

图 3 所示为 Magnus 力驱动的轮轨式垂直轴风力机的工作示意图,风力机轨道由圆形取代了早期的 Madaras 大型实验方案的椭圆形环形. 取风力机单枚柱状叶片为研究对象,以风轮旋转中心为原点,建立直角坐标系 xOy ,以叶片安装位置为原点,建立随体坐标系 mO_1n . 设已知水平来流风向为 U , ω 为叶片绕原点 O_1 自转角速度, W 为叶片绕原点 O 公转角速度, WR 为叶片绕原点 O 公转线速度, V 为相对风速,忽略叶片的诱导速度和叶片运动前后气流的干扰,相对风速 V 满足

$$V = WR + U.$$

根据库塔-儒可夫斯基定理给出的有旋圆柱绕流升力公式可知

$$F_L = \rho \Gamma V = 2\pi\rho\omega r^2 V.$$

式中, ρ 为空气的密度 (kg/m^3), Γ 为围绕圆柱的环量(旋涡强度), 定义为包含柱体闭合路径积分, U 为均匀来流风速 (m/s), r 为柱状叶片半径 (m).

根据库塔-儒可夫斯基定理有旋圆柱绕流阻力 F_D 为

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot 2rh = C_D \rho rh V^2.$$

式中, C_D 为实验测定的阻力系数, h 为柱状叶片高 (m).

由于风轮旋转时,只有升力和阻力的合力 N 向 n 轴投影所得的分力是驱动力 F_n 做功,向 m 轴投影所得的分力是非驱动力 F_m , F_m 作用在绕原点 O 公转的柱状叶片所在的钢轨上,其不做功,此处对于非驱动力不作过多讨论. 对于驱动力 F_n 如下式所示

$$N = F_L + F_D = F_n + F_m,$$

$$F_n = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha = 2\pi\rho\omega r^2 V \sin \alpha - C_D \rho rh V^2 \cos \alpha.$$

式中, α 为攻角,是相对速度 V 与切线速度 WR 之间小于 π 的夹角 (rad).

风力机中心原点 O 受到的转矩为

$$M = (F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha) \cdot R = 2\pi\rho\omega r^2 VR \sin \alpha - C_D \rho rh V^2 R \cos \alpha.$$

转矩 M 的大小受到合成速度 V 、风速 U 、柱状叶片高度 h 、柱状叶片自转半径 r 、柱状叶片公转半径 R 及方位角 θ 等参数的影响,转矩 M 的瞬时大小和方向受方位角 θ 的制约.

2.2 Magnus 转子叶片的升力极限问题

旋转圆柱的表面速度由无环量圆柱绕流的表面速度与点涡在圆柱表面的环量速度 Q 两部分合成. Prandtl^[9]指出当 $Q = 2V$ 即驻点在圆柱下表面重合时,旋转圆柱的升力系数达到最大值 4π . 其原因在于圆柱转速进一步增大时,驻点将脱离圆柱表面,在圆柱附近区域形成封闭的环状流线. 因此,圆柱附近的环量无法再向尾迹中脱落,升力系数达到极限值. Prandtl 特别指出这里的环量速度 Q 并不等同于圆柱旋转速度 q . 实验结果显示当圆柱的旋转速度 q 大约等于 $4V$ 时旋转圆柱的升力系数接近于该极限值. Glauert^[10]则认为边界层内的剪切作用随着圆柱转速会不断增大,其原因在于当圆柱表面附近的涡量积累到一定程度以后,会在离心力的作用下穿越封闭流线向尾迹中脱落,因此升力系数可能会超过 4π 极限,而随圆柱转速不断增大. 此外,他也解释了实验中测得的升力系数之所以不超过 4π 的原因主要是受流动三维效应等因素的影响.

2.3 转子的升力和升力系数

在二维空间里,柱状叶片的空气动力特性可简化为旋转圆柱的空气绕流模型,其升力 F_L 可以由库塔-儒可夫斯基定理求出,

$$F_L = \rho \Gamma V.$$

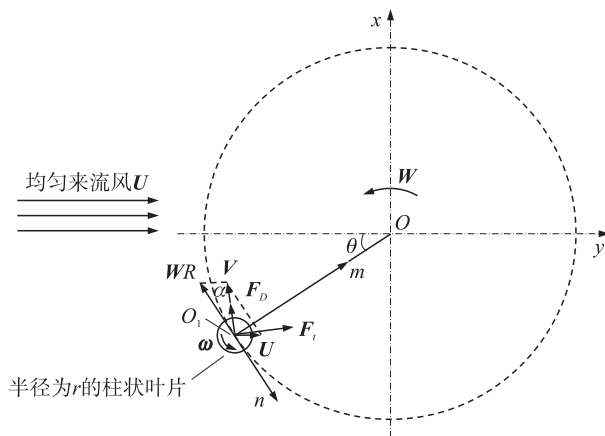


图 3 轮轨式单叶片垂直轴风力机数学模型

Fig. 3 A single blade mathematical model of a wheel rail vertical axis wind turbine

式中, $\Gamma = \int \mathbf{v} ds$. 其中, \mathbf{v} 为路径, s 为切线方向的速度 (m/s).

或

$$\Gamma = \int \boldsymbol{\omega} r ds = \int_0^{2\pi} \boldsymbol{\omega} r^2 d\psi = 2\pi \boldsymbol{\omega} r^2.$$

于是,

$$F_L = \rho \Gamma V = 2\pi \rho \boldsymbol{\omega} r^2 V, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{2\pi \boldsymbol{\omega} r}{V h}.$$

式中, C_L 为升力系数.

在理想情况下,影响升力大小的因素有合成速度 V 、柱状叶片自转角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 、柱状叶片自转半径 r 的二次方和空气密度 ρ .

2.4 马格纳斯柱状叶片风力机的其它特性参数

2.4.1 转矩系数非曲直 C_M

转矩 M 是体现风力机整机性能的主要参数. 为便于比较,常常使用无量纲函数转矩系数 C_M 来表示风力机所受到的转矩 M 的大小,

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 AR}.$$

2.4.2 升阻比 t

在柱状旋转叶片的公转过程中,当叶片的升阻比最大时,风力机的气动性能达到最优,高升阻比对风力机的效率有重要的促进作用,通常期望风力机工作在叶片升阻比最大的状态,

$$t = \frac{C_L}{C_D}.$$

2.4.3 尖速比 λ

当风力机在理想情况下稳定运转时,此处的尖速比为柱状叶片相对于其几何中心和风轮中心最外缘的速度与相对速度的比值. 当风力机处于未超速运转状态时,其效率正相关于尖速比,较高的尖速比使风力机获得更大的效率和风能利用率,它也是衡量整机性能的一个重要参数指标.

$$\lambda = \frac{\mathbf{WR} + \mathbf{W}_r}{V}.$$

2.4.4 风能利用率 C_p

风力机的风能利用率 C_p 定义为单位时间内风力机从风中实际提取的能量 P_t 与风场蕴含的能量 P_w 的比值, C_p 也是描述风力机性能的重要评价参数. 风能利用率的意义在于它表示了风力机将风能转化为有用能的能力的大小,风能利用率越高代表风力机从自然风能中吸收的能量越多,整机的气动性能越好.

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{MW}{\frac{1}{2} \rho U^2 AU} = \frac{MW}{\frac{1}{2} \rho AU^3}.$$

式中, A 为柱状单叶片最大迎流面积.

2.5 C_p - λ 曲线

由于工程上常以无量纲的性能曲线来表示设备的运行特性,而对于风力机来说,尖速比和风能利用率是衡量风力机性能的重要参数指标. 因此,常以尖速比 λ 的函数来表示风机的功率系数 (即风能利用率 C_p),即通过 C_p - λ 曲线来衡量风力机的运行特性.

2.6 结语

在轮轨式垂直轴风力机中,就单一叶片而言,均匀来流风绕流叶片的问题可抽象化为旋转圆柱的绕流问题. 旋转圆柱叶片的表面速度由无环量圆柱绕流的表面速度与叶片圆柱中心点涡在圆柱叶片表面的环量速度两部分合成. 随着叶片旋转,其表面环量速度从零开始增加,叶片前后两个驻点逐渐相互靠近,当

环量速度增加到 $2U$ 时,两个驻点在叶片表面正下方重合. 旋转圆柱叶片的升力系数达到最大值 4π . 若叶片转速进一步增大,根据 Kelvin 定理,尾迹中必定有一个大小相等方向相反的环量脱落出去. 因此,叶片表面重合驻点将脱离叶片表面,在叶片附近区域形成封闭的环状流线,此时,叶片附近的环量无法再向尾迹中脱落,升力系数和升力达到极限值.

实际中,均匀来流风绕流叶片,由于粘性的影响,叶片所受绕流阻力不为零,风绕流叶片对叶片公转产生的阻力由摩擦阻力和压差阻力两部分组成. 由于绕流阻力的复杂性,绕流阻力尚不能通过理论计算确定,而要借助于实验来测定. 通常用无量纲阻力系数 C_D 进行分析,阻力系数与阻力的关系定义为 $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$,其

中 A 为柱状单叶片最大迎流面积. 绕流阻力大小与雷诺数 Re 密切相关^[11]. 在层流状态下,阻力系数 C_D 仅取决于雷诺数 Re ,在紊流状态下,阻力系数 C_D 还与物体表面粗糙度、紊流强度、尾涡区的宽度等因素有关.

3 Magnus 风力机的技术可行性

研究 Magnus 力驱动的轮轨式风力机的技术可行性,首先需要研究近 100 年前试验失败的理论和技術原因,并在更加深入研究和解决理论问题的基础上探讨用现代先进的技术解决以前遇到而不能解决的技术问题,若以上问题都能逐一解决,则垂直轴风力机便可解决技术可行性问题. 目前,在水平轴风力机向大型化发展的过程中,遇到了难以解决的降低发电成本等问题,给大型化、低制造安装和维护成本的轮轨式垂直轴风力发电机提供了市场空间. 垂直轴柱状叶片风力机设计思想的提出,建立在现代自动控制技术、电机伺服驱动技术、现代制造技术等近几十年来有巨大发展成果的技术基础上,已完全可以解决当时无法解决的技术问题.

[参考文献](References)

- [1] ION P. Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept[M]. Canada:Polytechnic International Press,2002.
- [2] 伊恩·帕拉斯基沃尤. 垂直轴风力机原理与设计[M]. 上海:上海科学技术出版社,2013.
PARASCHIVOIU I. Wind turbine design with emphasis on darrieus concept[M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers,2013.(in Chinese)
- [3] BROWN K A,BROOKS R. Design and analysis of vertical axis thermoplastic composite wind turbine blade[J]. Plastics rubber and composites,2013,39(3/4/5):111-121.
- [4] HIDEKI K,MANABU T,TOSHIYUKI B. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane-mechanism of performance improvement[C]//Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Japan,2008;617-623.
- [5] TAKAO M,OKI M,MAEDA T,et al. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row[C]//2007 Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference. Denmark,2007;1 051-1 056.
- [6] 李岩. 垂直轴风力机及其发展概况[J]. 可再生能源,2009,27(1):121-123.
LI Y. Vertical axis wind turbine and its development[J]. Renewable energy resources,2009,27(1):121-123.(in Chinese)
- [7] SPERA D A. Wind turbine technology:fundamental concepts of wind turbine engineering[M]. New York:ASME,1994.
- [8] BURTON T. 风能技术[M]. 北京:科学技术出版社,2009;132-142.
BURTON T. Wind technology[M]. Beijing:Science Press,2009;132-142.(in Chinese)
- [9] PRANDTL L. Application of the“magnus effect”to the wind propulsion of ships[R]. Washington:NACA Technical Memorandum,1926.
- [10] GLAUERT M B. The flow past a rapidly rotating circular cylinder[J]. Proceedings of the royal society A,1957,242(1 228):108-115.
- [11] 勒古里雷斯 D. 风力机的理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1987;31-33.
GOURIERE L D. Wind power plants-theory and design[M]. Beijing:China Machine Press,1987;31-33.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]