

## 独立小型风能热利用系统的选型

刘竹青<sup>1</sup> 李里特<sup>2</sup> 山口智治<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083; 2. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院,北京 100083;  
3. 筑波大学 农林工学系,日本 筑波市 305-8572)

**摘要** 利用雷诺平均 Navier-Stokes 方程,采用标准  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,对具有代表性的 FFA-W 系列翼型的气动性能进行了模拟计算,结果表明该系列翼型适合于在风能热利用系统中应用。探讨了台阶翼型在系统中应用的可行性。分析了系统气动扭矩和负载匹配的关系,对各种热能转换设备的特性进行了比较,结果表明,选用油泵作为负载,薄壁阻尼孔作为热转换设备,可以使系统始终在最佳工况点运行。结合分析,给出了系统的主要选型结果。

**关键词** 风能; 热利用系统; 风力机; 气动性能

**中图分类号** TK83

**文章编号** 1007-4333(2004)03-0056-04

**文献标识码** A

## Research on the system of stand-alone small-scale wind energy heat utilization

Liu Zhuqing<sup>1</sup>, Li Lite<sup>2</sup>, Yamaguchi Tomoharu<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
3. Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan)

**Abstract** The several key problems that the researchers have to meet in the selecting research of the wind energy heat utilization were discussed. The Reynolds averaged navier-stokes equations were used and the standard  $k-\epsilon$  double equations turbulence model was chosen. The aerodynamic characteristics of one FFA-W aerofoil were calculated and the result indicated that this kind of aerofoil was proper to be chosen in the wind energy heat utilization system. The feasibility of choosing the step aerofoil in the system was discussed. On the basis of analyzing the relation between the system aerodynamic torque and the load, and comparing with characteristics among the different wind energy conversion equipments, the result that choosing the oil pump as the load and the thin orifice as the heat conversion equipment is a better method, and can make the system running at the best situation. A kind of the selection result of the stand-alone small-scale wind energy utilization system has been offered.

**Key words** wind energy; heat utilization system; wind turbine; aerodynamic performance

风能是目前世界上利用率增长最快的绿色能源,预计到2020年,风能将成为世界第三大能源<sup>[1]</sup>。研究表明,在风能利用系统的所有形式中,风能直接热利用系统的综合效率最高<sup>[2]</sup>。1980年前后,日本、丹麦等国家开始研究风能热利用技术。日本北海道农业试验场研制的MOD-3型系统,热转换效率达到了0.35~0.45,水温可加热到80℃,取得了

接近实用化的成果<sup>[3]</sup>。由于系统规模小,部件耐久性差,一次性投资较大,以及这些国家能源战略重点的调整等因素,20世纪90年代以后,风能热利用技术发展缓慢。目前,国内的研究还处于理论和模型试验阶段。

风能热利用系统选型时,翼型的分析与选择、系统气动扭矩和负载匹配关系的分析、热能转换设备

收稿日期:2003-11-30

作者简介:刘竹青,博士,主要从事风能利用的研究,E-mail:liuzhuqing@sina.com

的确定是需要研究的主要问题。其中,风力机叶片翼型的气动性能直接影响风力机的风能利用系数,故叶片翼型的气动性能是决定系统综合性能的关键因素之一。国际上风力机专用翼型的研究始于 20 世纪 80 年代后期,美国、瑞典和丹麦等风能技术发达国家都发展了各自的翼型系列,其中以瑞典的 FFA-W 系列翼型最具代表性。近几年,一种称为台阶翼型的翼型概念在机翼翼型的研究中已有大量研究成果,但在风力机等旋转机械中还没有这种翼型研究成果的报道。基于此,在分析计算 FFA-W3 系列翼型后,对台阶翼型在风能热利用系统中应用的可行性进行了探讨。在国内,风力机翼型的研究工作仍停留在普通航空翼型阶段,对新翼型的研究尚很少<sup>[4]</sup>。

针对风能热利用系统中风力机运行时不存在联网风力发电中的强耦合关系的特点,分析了系统的气动扭矩和负载匹配关系。

### 1 翼型的分析与选择

利用雷诺平均 Navier-Stokes 方程,采用标准  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,分析计算了 FFA-W3 系列翼型中有代表性的 FFA-W3-211 翼型的气动性能,控制方程采用可压缩雷诺平均 N-S 守恒方程的量纲 1 积分形式<sup>[5]</sup>：

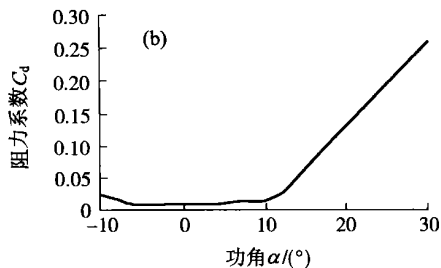
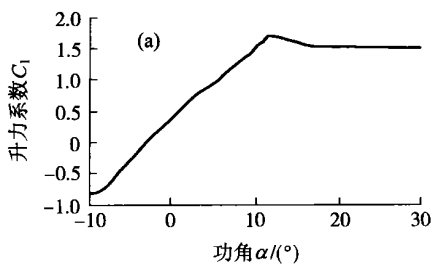


图 1 翼型的升力(a)和阻力(b)曲线

Fig. 1 The lift and drag curves of the airfoil

在本系统的选型过程中,还探讨了采用最新航空翼型——台阶翼型的可行性。由气动理论可知,风力机高效工作,叶片的翼型断面需要有很大的升阻比,使翼型具有最大的升力和最小的阻力。最新的研究表明,采用台阶翼型,如台阶尺寸恰当,由于台阶的激励作用,升力系数有时可增大 100%,而升阻比可提高 50%。在风能热利用系统中可以采用台阶翼型,研究方法是先选定基准翼型,然后在风洞中进行测试,寻求最佳的台阶位置及其尺寸。现有

$$\iiint \frac{\partial U}{\partial t} d + \iint P_1 d + \iint P_2 d = \iiint d \quad (1)$$

式中：

$$U = [w, u, v, H - p]^T$$

$$P_1 = [w, w^2 + p, wu, wv, wH]^T i_z + [u, uw, u^2 + p, uv, uH]^T i_r + [v, vw, vu, v^2 + p, vH]^T i$$

$$P_2 = [0, z_z, z_r, z, z_z w + z_r u + z v - q_z]^T i_z + [0, z_r, r_r, r, z_r w + r_r u + r v - q_r]^T i_r + [0, z, r, z, z w + r u + v - q]^T i$$

$$S = [0, 0, p/r + (v + wr)^2/r, -2wu - uv/r, 0]^T$$

式中： $w, u, v$  分别表示  $z, r, \theta$  3 个方向的速度分量； $\rho$  为密度； $H$  为转子焓； $i_{ij}$  为黏性应力张量分量,共 9 个； $q_i$  为热通量。

湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,网格划分按照多块网格拼凑技术生成 H 型网格,壁面处采用标准壁面函数处理。计算结果表明,该翼型具有较大的升阻比,适于本系统选用。图 1 示出计算得到的翼型在雷诺数  $Re$  为  $3 \times 10^6$  时的升力系数  $C_l$  和阻力系数  $C_d$ 。

风车的风能利用系数一般为 0.40 左右,采用该翼型后,风能利用系数理论上预计可以达到 0.46,风能利用率可提高近 15%<sup>[6]</sup>。

### 2 系统气动扭矩与负载匹配关系

根据风力机气动分析,风轮气动扭矩可表示为

$$T_a = \frac{1}{2} \rho r^3 c_T v^2 \quad (2)$$

式中： $T_a$  为风轮气动扭矩, N·m； $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>；

$m^3$ ;  $r$  为风轮叶尖回转半径,  $m$ ;  $c_T$  为叶尖速比为时的扭矩系数,  $= \tau r / v$ , 其中  $\tau$  为风轮转动角速度,  $rad/s$ ;  $v$  为风速,  $m/s$ 。则风车的气动功率为

$$P_a = T_{q \tau} = \frac{1}{2} \rho r^3 c_p v^3 \quad (3)$$

式中:  $c_p$  为风能利用系数,  $c_p = c_T$ 。

由式(3)可知,  $P_a$  与  $v^3$  及  $c_p$  成正比。当风速给定时, 风车获得最大功率的条件是其风能利用系数最大。对于给定的风轮,  $c_p$  与  $\tau$  的关系是确定的, 只有在  $\tau$  为最大值时, 风能利用系数最大。风车恒速运行时, 其转速不变, 而风速在变化, 因此不可能保持最大值,  $c_p$  经常与其最大值相差很大, 从而使风车常常运行于低效状态。如果适当控制负载功率, 使风车变速运行, 则可能使  $c_p$  保持恒定的最大值, 从而使  $c_p$  在较大的风速变化范围内保持最大值, 使风能转换为机械能的效率问题有可能得到最佳解决<sup>[7]</sup>。在风能热利用系统中, 风车运行时不存在联网风力发电中的强耦合关系, 系统对频率敏感度比较弱, 故适于采用变速运行方式。

不同风速下风轮的输出扭矩与风轮转动角速度的关系见图2, 风速  $v_1 < v_2 < v_3$ 。调节风轮转动角速度使  $T$  保持最大值, 实质上是一个典型的跟踪控制问题。即使风车的工作点保持在曲线  $C_1$  上, 且与风轮输出扭矩特性曲线的交点  $A, B, C$  分别对应风轮输出效率最高点。曲线  $C_1$  为负荷转矩与转动角速度的特性曲线, 该负荷就是风车的最佳匹配负荷,  $T = k \tau^2$ 。

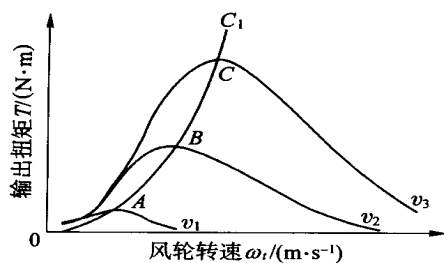


图2 输出扭矩特性

Fig. 2 Torque output characteristics

采用油压泵作为负载, 薄壁阻尼孔作为热转换设备, 其负载特性可以满足上述要求, 其中

$$Q = q \quad (4)$$

式中:  $Q$  为泵的流量,  $m^3/s$ ;  $q$  为泵的排量,  $m^3/r$ ;  $\tau$  为油压泵的转动角速度,  $rad/s$ 。如果采用薄壁阻尼孔作为泵的负载, 则阻尼孔的压力损失

$$p = k_1 Q^2 \quad (5)$$

式中:  $k_1$  为由阻尼孔径、管径、管路长度等负载系统决定的综合系数, 则油压泵扭矩

$$T = k_1 q^3 \tau^2 / (20 \rho) = k \tau^2 \quad (6)$$

由此可见,  $T$  与  $\tau^2$  成正比。适当选择油压泵的系统参数, 可以使风车工作在最佳工况点<sup>[8]</sup>。

设计控制系统时, 考虑到系统的稳定性, 工作状态的平稳过渡, 以及负载液压泵的工作特性, 采取了在一定风速范围内恒速运行, 超出该范围则改变转速的控制方法。

### 3 热能转换设备的确定

风能热利用系统中热能转换设备的热转方式主要有固体与固体、固体与液体、气体与气体或气体与固体摩擦方式, 油压泵与薄壁孔的联合方式等<sup>[9]</sup>。

固体与固体的摩擦方式不需要增速系统, 风车和负荷可以直接相连, 但磨损、摩擦面之间易过热和烧毁。与固体摩擦方式比较, 固体与液体摩擦方式, 即液体搅拌方式, 磨损和过热程度较小,  $T$  与  $\tau^2$  成正比, 但需要增速系统, 且高速时由于离心力的作用转速范围受到限制, 整体效率不高。气体与气体摩擦方式的工作介质是空气, 在严寒地区使用比较方便, 但噪音较大且负荷控制复杂。油压泵与薄壁孔联合方式可以直接驱动, 不需要增速系统,  $T$  与  $\tau^2$  成正比, 且与风车系统的整合性好, 应用较为广泛。

根据系统气动扭矩与负载匹配关系的分析, 确定本系统的热能转换设备采用油压泵与薄壁孔联合的热转换方式。

### 4 选型结果

将风能热利用系统划分为能量吸收、能量转换和能量存储 3 个子系统。

1) 能量吸收系统。主要包括风力机和塔架等。依照安全、经济、耐用的原则, 结合我国农村地区的技术应用水平, 确定了能量吸收系统的控制方式和各部件的形式和参数, 主要选型结果如下:

a. 部件参数和形式。叶片为 3 叶片的 FFA-W3 翼型, 采用炭化纤维材料; 风轮为定桨距轮毂, 下风向进风; 塔架为简易桁架式。

b. 控制方式或类型。增速系统为无齿轮箱的直联机构, 传动系统为直接变向传动, 转速控制为空气制动, 对风装置为风轮阻力控向。

叶轮通常采用上风向进风方式,这种方式效率较高,但系统稳定性较下风向方式差。下风向进风方式虽然会损失一些效率,但可增加系统的稳定性和使用寿命,降低维护费用,从而提高系统的整体经济性能。因此,本系统选用下风向进风方式。

2) 能量转换系统。能量转换系统中的热能转换设备选择油压泵与薄壁孔联合热转换方式。

3) 能量储存系统。考虑到我国能源消耗的实际情况和能量转换后热能的应用对象,能量的储存系统采用温水蓄热储能方式。本系统选用的是大型蓄热槽。

## 5 结束语

本文中对小型独立风能热利用选型中翼型的选择、系统气动扭矩和负载匹配关系、热能转换设备的确定进行了分析研究,结果表明,采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程和标准  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,可以分析计算翼型的气动性能,FFA-W3 系列翼型适合在风能热利用系统中应用。采用油压泵与薄壁孔联合的热转换方式可以满足  $T$  与  $v^2$  成正比的气动扭矩特性和负载匹配的关系,使风车工作在最佳工况点。

## 参 考 文 献

- [1] European Wind Energy Association and Greenpeace. Wind force 12-A blueprint to achieve 12 % of the world's electricity from wind power by 2020[M]. Belgium: European Wind Energy Association, 2001. 5 ~ 71
- [2] 杜白石. 风能与热利用[M]. 西安:西安地图出版社, 1997. 138 ~ 141
- [3] 牛山泉. 冬季寒冷地帯のエネルギー需要に適合[J]. 日本科学 7 技术, 1986, 27(5): 48 ~ 55
- [4] 叶枝全, 黄继雄, 陈严, 等. 风力机新系列翼型气动性能研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 211 ~ 215
- [5] 王保国, 黄虹宾. 叶轮机械跨音速及亚音速流场的计算方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. 219
- [6] 陈葆实, 胡国荣, 魏玉冰. 高马赫数、高负荷单级风扇设计和试验研究[A]. 21 世纪航空动力发展研讨会论文集[C]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2000: 88 ~ 93
- [7] Novak P, Ekelund T. Modeling and control of variable-speed wind turbine drive system dynamics[J]. IEEE Control System, 1995, 15(4): 28 ~ 38
- [8] 齐瑞贵, 李景春, 李蕾. 风能致热系统研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(2): 228 ~ 230
- [9] 牛山泉. 风车工学入门[M]. 东京:森北出版株式会社, 2002. 174 ~ 181