文章编号:1001-2060(2015)04-0632-07

垂直轴风力机叶片的流固耦合作用研究

孙芳锦,梁 爽,冯 旭

(辽宁工程技术大学建筑工程学院,辽宁,阜新123000)

摘 要:本研究对垂直轴风力机叶片的流固耦合作用进行研究。为克服任意拉格朗日方法进行流固耦合分析时流体的 过度变形问题,引入类似结构方程组处理流体域连续变形, 对流体网格结点坐标进行更新,采用同时求解流体方程和结 构方程的强耦合方法获得耦合系统的解。对垂直轴风力机 叶片进行了流固耦合分析,研究了叶片的气动性能。计算了 叶片的气动性能相关参数,研究发现,升力系数和阻力系数 攻角在0°-8°之间时,数值模拟结果与试验结果几乎相同, 当攻角约为8°时,开始出现失速特性。叶片旋转尖部产生 的涡与叶片产生的流固耦合作用引起了叶片的局部扰动特 性。结果表明本研究方法适用于垂直轴风力机叶片的流固 耦合计算。

关键词:垂直轴风力机;风力机叶片;流固耦合作用;类 似结构方程组;气动性能

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.034 引言

风力发电作为风能利用的最主要形式,近年来 得到国内外的广泛重视,也取得了长足发展。风力 机分为水平轴风力机和垂直轴风力机两类。水平轴 风力发电机的特点是叶轮转轴与地面平行,故称为 水平轴风力发电机。水平轴风力机是国内外研制最 常见、技术最成熟的一种风力机,并且已经形成了完 整的理论体系^[1],是目前商业化风力发电的主要形 式。垂直轴风力发电机的特点是叶轮转轴与地面垂 直,故称为垂直轴风力发电机。相比于水平轴风力 机的发展速度和规模,垂直轴风力机的发展要落后 得多,由于垂直轴风力机有控制结构及加工工艺简 单、经济效益明显等优点和广阔市场前景,吸引了众 多研究者的目光,正呈现出蓬勃发展的趋势。

风力机叶片是风力机的发电来源,叶片的性能 将直接影响发电机的效率。为了节约成本并获得更 多的风能,目前风力机叶片的设计更轻、更具柔性。 这导致叶片有较强的几何非线性,在运行工况下如 阵风作用等都会引起风轮叶片发生变形和振动,而 振动变形后又会影响到流场中气流的变化,是典型 的流固耦合振动问题。流固耦合作用会引起叶片的 气弹变形,可能使叶片振动过大,或振动失稳,甚至 导致疲劳破坏^[2]。因此,研究风机叶片的流固耦合 振动,建立有效可靠的风力机叶片流固耦合方法,研 究叶片振动特性的变化规律,对于确保叶片的安全 高效运行具有重要的理论意义和实用工程价值。

随着计算机技术的高速发展,数值模拟成为了 继风洞试验之后的重要研究手段。近年来建立合理 有效的数值模拟方法进行风机叶片的流固耦合分析 越来越受到研究人员的重视。文献[3-4]建立了 叶片设计的耦合数学模型,探讨了叶片流固耦合问 题的数值计算方法;文献[5]对翼型的流固耦合原 理进行总结阐述;文献[6]采用流固耦合方法对风 力发电机叶片在特定风场下进行了数值模拟,计算 了单个叶片的应变分布情况;文献[7]使用松耦合 方法对所建立的计算流体动力学(CFD)模块和计算 结构动力学(CSD)模块进行了耦合计算,得到了一 系列风力机运行条件下的叶片静力响应。文献[8] 建立了计算流固耦合作用的解析过程,并考虑了气 动压力和有限元分析对风力机叶片进行设计。

本研究对垂直轴风力机叶片的流固耦合作用进 行研究。为克服采用任意拉格朗日方法(ALE)进行 流固耦合分析时流体产生的过度变形,引入类似结 构方程组来处理流体域连续变形,求解与流体结点 相连的类似结构方程,得到网格结点位移,对流体网 格结点坐标进行更新,并采用同时求解流体方程和 结构方程的强耦合方法获得耦合系统的解。采用该 方法对垂直轴风力机叶片进行了流固耦合分析,研

收稿日期:2014-08-07; 修订日期:2014-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108345);同济大学土木工程防灾国家重点实验室开放基金(SLDRCE – MB – 04);辽宁省教育厅基金资助项目(L2013134)

作者简介:孙芳锦(1981-),女,辽宁沈阳人,辽宁工程技术大学副教授.

究了叶片的气动性能。

1 控制方程

1.1 流体控制方程

流体控制方程为不可压粘性 Navie – Stokes 方程(简称 N – S 方程):

$$\nabla \bullet \nu_{\rm f} = 0 \tag{1}$$

$$\rho_{\rm f} \left(\frac{\partial \nu_{\rm f}}{\partial t} + \nu_{\rm f} \cdot \nabla \nu_{\rm f} \right) = \nabla \cdot \sigma_{\rm f} + f_{\rm f}^{\rm B}$$
(2)

式中: $\nu_{\rm f}$ 一流体流动速度; ∇一空间梯度; $\rho_{\rm f}$ 一流体 密度; $\sigma_{\rm f}$ 一流体的全应力张量(压力和粘性力), $\sigma_{\rm f}$ = μ [∇_{ℓ} + (∇_{ℓ})^T] - pI; μ 一流体粘度; p 一流体压 力; $f_{\rm f}^{\rm B}$ 一流体体积力。

1.2 结构控制方程

具有几何非线性的风力机叶片的控制方程可以 表示为^[9]:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ij,j} + f_i = \bar{\rho} (\frac{\partial U_i}{\partial t} \cdot \nabla + U_i)$$
(3)

式中: σ_{ij} 、 U_i 和 $\bar{\rho}$ 一应力张量、位移向量和叶片的密度; f_i 一与风压分布相关的向量。

结构的本构关系和几何关系可以写为:

$$\sigma_{ij} = 2Ge_{ij} + \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \tag{4}$$

式中: G 和 λ —剪力模量和 Lame 系数; ε_{kk} —Green – Lagrange 应变张量; e_{ij} 、 δ_{ij} —单位张量。

2 空气和风力机叶片的耦合

流体和结构耦合的重要问题之一就是处理交界 面上的网格变形,由于任意拉格朗日方法(ALE)中 流体和结构的描述方式不同(欧拉法和拉格朗日 法),因此导致流固交界面处的网格是不一致的,那 么就需要处理网格避免畸变网格的产生。为克服上 述任意拉格朗日方法中流体由于结构网格的大变形 产生的过度变形,本研究通过引入类似结构(模型) 方程组来处理流体域连续变形的方法,求解与流体 结点相连的类似结构方程组得到网格结点位移的方 法,达到对流体网格结点坐标进行更新的目的。这 种方法将流体网格看成是类似于固体结构,因而将 网格移动问题转化为线性固体力学问题,此时将实 际的结构网格位移看成是边界条件,目的就是要移 动流体网格,这个问题本身的解并没有实际的物理 意义^[10]。

根据结构方程的表达形式,类似结构方程组可

以表示为:

 $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ij,j}^{ss} = 0 \tag{5}$

$$\boldsymbol{\tau}_{ij,j}^{SS} = 2\boldsymbol{\mu}^{SS}\boldsymbol{\varepsilon}_{kk}^{SS} + \boldsymbol{\lambda}^{SS}tr(\boldsymbol{\varepsilon}_{kk}^{SS})\boldsymbol{\delta}_{ij}$$
(6)

式中: μ^{ss} 和 λ^{ss} 一类似结构模型的 Lame 系数; ε_{kk}^{ss} 一 类似结构模型的 Green – Lagrange 应变张量; δ_{ij} 一单 位张量。

流体和结构在交界面上的耦合条件为:

$$\sigma_{ij,j}^{\text{FSI}} \bullet n^{\text{S}} + \sigma_{ij}^{\text{FSI}} \bullet n^{\text{F}} \bar{\alpha} \Gamma_{\text{FSI}} \underline{\perp}$$
(7)

$$v_{\rm I}^{\rm F} = v_{\rm I}^{\rm S} \stackrel{}{\propto} \Gamma_{\rm FSI} \stackrel{}{\perp} \tag{8}$$

$$d_{\rm I}^{\rm SS} = d_{\rm I}^{\rm S} \stackrel{}{=} \mathcal{I}_{\rm FSI} \stackrel{}{\models} \tag{9}$$

式中: v_1^{F} 和 v_1^{s} 一交界面上流体和结构的速度; d_1^{ss} 和 d_1^{s} 一交界面上的类似结构模型的位移和结构位移; Γ_{FSI} 一流体和固体的交界面; $n^{\text{ss}} n^{\text{F}}$ 一结构和流体的 外法线方向向量, $n^{\text{F}} = -n^{\text{ss}}$ 。

为得到流固耦合体系的耦合方程,需要对流体 域、结构域以及类似结构方程组进行离散,这里采用 伽辽金有限元法进行离散,时间上的离散采用隐式 有限差分方法。

流体方程式(1)、式(2)的离散格式为:

$$\int_{\Omega^{\rm f}} \omega \, \nabla \cdot \, \nu_{\rm f} \mathrm{d}\Omega = 0 \tag{10}$$

$$\int_{\Omega^{\mathrm{f}}} (-\zeta \bullet \rho_{\mathrm{f}} (\frac{\partial \nu_{\mathrm{f}}}{\partial t} + \nu_{\mathrm{f}} \bullet \nabla \nu_{\mathrm{f}}) - \nabla \zeta : \sigma + \zeta \bullet f_{\mathrm{f}}) \, \mathrm{d}\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_{\rm N}^{\rm f} \cup \Gamma_{\rm FSI}} \zeta \cdot (\sigma_{\rm f} \cdot n_{\rm I}^{\rm f}) \, \mathrm{d}\Gamma = 0 \tag{11}$$

式中: Ω 一边界由流体的 Dirchlet 边界条件 $\Gamma_{\rm D}$ 、 Neumann 边界条件 $\Gamma_{\rm N}$ 和流体 – 固体的交界面 $\Gamma_{\rm FSI}$ 构成的空间域; $\Omega_{\rm f}$ 一流体域; $\omega \zeta$ 一检验函数。

结构方程(3)的离散形式为:

$$\int_{\Omega_0^{\rm S}} (\nabla \cdot \theta : \sigma_{ij,j} + \theta \cdot f_i - \overline{\rho} \cdot \theta (\frac{\partial U_i}{\partial t} \cdot \nabla + U_i))$$
$$d\Omega + \int_{\Gamma_{\rm N0}^{\rm S} \cup \Gamma_{\rm FSI}} ((\theta \cdot n_0^{\rm S}) : \sigma_{ij,j}) d\Gamma = 0$$
(12)

式中: θ 一检验函数; Ω_0^s 和 Γ_{FSI0} 一风机叶片的初始 位形和流固交界面的初始位形; n_0^s 一初始位形上流 体边界面的外法线方向单位向量。

类似结构方程组(5)的离散形式为:

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot \theta \cdot \sigma_{ij,j}^{ss}) \, \mathrm{d}\Omega + \int_{\Gamma_{N0}^{s}} ((\theta \cdot n_{0}^{s}) \cdot \sigma_{ij,j}^{ss}) \, \mathrm{d}\Gamma = 0$$

$$(13)$$

耦合条件(7)的离散形式为:

$$\int_{\Gamma_{\rm FSI0}} \boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\rm ij,j}^{\rm FSI} \cdot \boldsymbol{n}_0^{\rm S} \mathrm{d}\boldsymbol{\Gamma} + \int_{\Gamma_{\rm FSI1}} \boldsymbol{\zeta} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\rm if}^{\rm FSI} \cdot \boldsymbol{n}_1^{\rm F} \mathrm{d}\boldsymbol{\Gamma} = 0$$
(14)

式中第一项是在初始位形上结构的贡献,第二 项是在已变形网格上流体的贡献。

耦合条件(8) 采用 one – step – θ 时间离散,可 以写为:

$$v_{n+1}^{\rm F} = \frac{1}{\theta} \frac{\mathrm{d}d_{\Gamma_{\rm FSI}}^{n+1} - \mathrm{d}d_{\Gamma_{\rm FSI}}^{n}}{\mathrm{d}t} - \frac{1-\theta}{\theta}v_{\rm f}^{\rm n} \tag{15}$$

参数 θ 的取值范围为 $1/2 \leq \theta \leq 1^{[11]}$ 。

那么式(9) 表示交界面上的线弹性模型的位移 与流体速度的关系可以表示为:

 $d^{\mathrm{SS},n+1} = d^{\mathrm{S},n} + \theta \Delta t v_{n+1}^{\mathrm{F}} + (1 - \theta) \Delta t v_{n}^{\mathrm{F}} \qquad (16)$

风机叶片和空气形成的流固耦合体系的方程由 方程(10) - 方程(16) 组成,采用 Newton - Raphson 法同时求解上述方程组的强耦合法得到方程的解。

3 算例分析

采用 FORTRAN 编制了上述强耦合法的数值模 拟程序,这里对 Dar rieus 型垂直轴风力机叶片进行 流固耦合分析。该 Darrieus 型垂直轴风力机包括两 个直叶片,叶片型号为 NACA0012,叶片弦长是 9.14 cm,转子尖速为45.7 cm/s,尖速比为5。图1 给出了风力机叶片的位置和方位角的定义,关于该 垂直轴风力机更详细的资料可参考文献[12]。





Fig. 1 Location and azimuth of wind turbine blade

首先,对该垂直轴风力机叶片进行了静态气动 力分析,图2给出了不同攻角下叶片的升力系数和 阻力系数的变化,并分别与已有结果进行了对比^[12-13],这里雷诺数 *Re* = 40 000。重点是考查本研究方法在叶片流固耦合作用分析中的应用,因此这里暂未考虑湍流影响。





从图 2 可以看出,升力系数和阻力系数当攻角 在 0°-8°之间时,数值模拟结果与试验结果几乎相 同,可以看出当攻角在 0°-5°之间时,数值模拟的 升力系数和阻力系数呈线性变化,且模拟得到的升 力系数略大于试验值,阻力系数略小于试验值。但 当攻角大于约 8°时,数值模拟的升力系数和阻力系 数与试验结果的差距较大;当攻角大于约 9°时,数 值模拟的升力系数、阻力系数和试验结果又变得非 常接近。这说明叶片在攻角约为 8°时,开始出现失 速特性,事实上计算得到的失速角为 8°^[12],这也证 明了本研究方法的正确性。进一步对比图 2 中数值 计算与试验的叶片升力系数和阻力系数曲线,可以 得出二者随攻角的变化趋势相同,且在叶片失速区 域内数值计算与试验值差异最大。 根据文献 [12],作用于叶片截面上的法向力和 切向力可以转化为截面无量纲法向力和切向力,这 些无量纲力与截面法向力系数和切向力系数相关, 具体公式参加文献 [12]。为了便于与已有结果对 比,本研究计算了叶片跨中截面无量纲法向力和无 量纲切向力。图3给出了采用本研究方法计算得到 的叶片跨中截面无量纲法向力和无量纲切向力随叶 片方位角的变化,并与已有数值模拟结果进行了 对比^[12-13]。



图 3 叶片跨中截面法向力和切向力 随叶片方位角变化

Fig. 3 Variation of sectional normal force and tangential force with blade azimuth at mid – span

分析图3可以看出,数值模拟得到的无量纲法 向力和无量纲切向力随叶片方位角的变化趋势与之 前已有的试验结果和数值模拟结果一致,但更接近 Fletcher 的模拟结果^[13]。由于 Strickland 的数值计 算结果是基于二维假设的^[12],而叶尖由于叶片间的 空隙一般会形成涡,这种涡会沿着下游移动,并与叶 片发生流固耦合作用,而这种流固耦合作用不能简 单的假设为二维流场。而 Fletcher 的结果考虑了三 维气动效应,本研究方法也考虑了这种流固耦合作 用的三维效应,因此是适用于三维计算的。

图4和图5分别给出了风力机完全旋转一周 (360°)无量纲法向力和切向力沿叶片跨径方向的 分布,以及典型方位角下法向力和切向力沿跨径的 分布规律。可以看出,荷载沿叶片跨径方向的分布 当方位角在0°-180°之间,即在上游部分时,与方 位角在180°-360°,即下游部分有很大差异。在上 游部分时,叶片荷载的气动力(法向力和切向力)分 布均匀,且随着向叶片尖部靠近,气动力稳步较小。 而在下游部分时,气动力则呈现出一些列脉冲、突变 的局部扰动特性,且结构要比上游复杂得多,下游这 些局部扰动特性的出现很可能是由于风力机前一次 完全旋转时叶片尖部产生的涡与本次完全旋转时的 叶片产生的流固耦合作用所产生的。

由于叶片处的入射流方向呈循环性变化,导致 叶片的局部速度也随方位角做循环性变化。为进一 步分析气流和叶片间流固耦合作用,这里给出了叶 片跨中截面的气动攻角随叶片方位角的变化规律, 并与几何攻角随方位角的变化规律进行了比较,如 图 6 所示。其中叶片的几何攻角 φ 可以写为减速比 λ 和方位角 ψ 的函数^[13]。

 $\varphi = \arctan(\frac{\sin\psi}{\lambda + \cos\psi})$

从图6可以看出,叶片跨中截面气动攻角总体 上要小于几何攻角,这可能是由于叶片经过旋转轴 线向下游移动时,由前面叶片产生的漩涡效应造成 的,这也是导致叶片荷载随方位角分布不对称的原 因之一,如图4和图5中情况。计算得到的叶片跨 中气动攻角仅当叶片在上游部分时才与基本失速角 范围一致,说明对于这一失速比下的叶片跨中截面 是不会发生失速的。

为了说明本研究方法的计算效率,将计算叶片 跨中截面无量纲法向力和无量纲切向力所需时间, 与有限元软件 ANSYS 的计算结果进行了对比,结果 如表1所示。



225

270

)

0

315

360

热

能

动

力

T

程

• 636 •







图 5 沿叶径方向无量纲切向力分布图 Fig. 5 Distribution of non-dimensional tangential force along mid-span of blade

从表1中可以看出,计算无量纲法向力和切向 力时,本研究方法所需时间比ANSYS要分别多耗费 13.8%和14.3%,但计算结果却更接近已有模拟结 果^[13],计算的无量纲法向力和切向力的精度比AN-SYS的计算精度分别提高26.4%和31.5%。计算 结果表明,本研究提出的方法的计算效率是较高的。 本研究方法耗时多的重要原因是计算中需要计算流 固耦合系统的整体矩阵。

表1 不同计算方法计算时间对比

Tab. 1 Comparison of computing time for various methods

方 法	计算时间/h	
	无量纲法向力	无量纲切向力
本研究方法	12.3	13.6
ANSYS	10.8	11.9



图 6 叶片跨中截面攻角随叶片方位角变化 Fig. 6 Variation of angle of attackwith blade azimuth at mid-span section

4 结 论

(1)升力系数和阻力系数当攻角在 0°-8°之间时,数值模拟结果与试验结果几乎相同。但当攻角大于约8°时,数值模拟的升力系数和阻力系数与试验结果的差距较大;当攻角大于约9°时,数值模拟的升力系数阻力系数与试验结果又变得非常接近。叶片在攻角约为8°时,开始出现失速特性。

(2) 数值模拟得到的无量纲法向力和无量纲切向力随叶片方位角的变化趋势与已有的计算结果一

致,但更接近考虑三维效应的结果,说明本研究方法 适用于三维计算。

(3)叶片荷载的气动力在上游部分和下游部分 有很大差异。在上游部分时,叶片荷载的气动力分 布均匀。而在下游部分时气动力则呈现出脉冲、突 变的局部扰动特性,这些局部扰动特性的出现很可 能是由于叶片旋转尖部产生的涡与叶片产生的流固 耦合作用引起的。

(4) 叶片跨中截面气动攻角总体上要小于几何 攻角,这可能是由于叶片经过旋转轴线向下游移动 时,由前面叶片产生的漩涡效应造成的。

(5) 虽然计算中并未考虑湍流影响,但对于风 与垂直轴风力机叶片流固耦合作用这一难点问题却 进行了积极的研究和探索,为更准确的进行垂直轴 风力机叶片的设计提供了可靠的方法,所得到的相 关结论对于垂直轴风力机叶片的设计也是非常有价 值的。可以预测的是,本研究中若加入湍流模型,其 计算精度将会大幅度提高,但耗费机时也会增加,因 此选取合适的湍流模型与本研究方法相结合是下一 步非常值得探讨的问题。

参考文献:

- [1] 孙云峰,田德,垂直轴风力发电机的发展概况及趋势[J].农村牧区机械化[J].2008(2):42-44.
 SUN Yun-feng, TIAN De. Development survey and trend of vawt
 [J]. Rural Pastoral Mechanization, 2008(2):42-44.
- [2] Sabbah Ataya, Mohamed M Z. Ahmed, Damages of wind turbine blade trailing edge: Forms, location, and root causes [J]. Engineering Failure Analysis, 2013(35): 480-488.
- [3] Jianping Zhang, Lin Pan. Three-Dimensional modeling and aeroelastic coupling analysis for the wind turbine blade [C]. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2009.
- [4] 陈海萍,孙文磊,郭 建.风力发电机叶片的流固耦合分析
 [J].机床与液压,2010,38(19):79-82.
 CHEN Hai-ping,SUN Wen-lei,GUO Jian. Fluid-solid coupling analysis on wind generators blade [J]. Tool and hydraumatic,2010, 38(19):79-82.
- [5] David M. Schuster, Liu D D, Lawrence J. Computational aeroelasticity, success, progress, challenge [J]. Journal of Aircraft, 2007, 40(5): 843 – 856.
- [6] Ivan Dobrev, Fawaz Massouh. Fluid-structure interaction in the case of a wind turbine rotor [C]. 18th French Congress in Mechanics, Grenoble, France. 2007.

- [7] Yu D O, Kwon H I, Kwon O J. Performance enhancement of HAWT rotor blades by aerodynamic shape optimization [C]. AIAA-Paper, 2012: 1292.
- [8] Ya-Jung Lee, Yu-Ti Jha, Cheng-Hsien Chung. Fluid-structure interaction of FRP wind turbine blades under aerodynamic effect [J]. Composites: Part B 43 (2012) 2180 – 2191.
- [9] 白象忠,磁弹性、热磁弹性理论及其应用[J]. 力学进展,1996,26(3):390-406.
 BAI Xiang-zhong. Magnetoelasticity, thermal-magnetoelasticity and their applications [J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(3):390-406.
- [10] Wang C Z, Wu G X. An Unstructured-mesh-based Finite Element Simulation of Wave Interactions with Non-wall-sided Bodies [J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(5): 441 - 461

*સસસસસસસસ

- [11] Förster C, Wall W A, Ramm E. On the geometric conservation law in transient flow calculations on deforming domains [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2005(50): 1369 - 1379.
- [12] Strickland J H, Smith T, Sun K. A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study [R]. Sandia Technical Report SAND81 – 7017, 1981.
- [13] Fletcher T M, Brown R E, Kim D H, et al. Predicting wind turbine blade loads using vorticity transport and RANS methodologies [C]. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Marseille, 2009.

(单丽华 编辑)

FT4000 SP60 和 FT 4000 SP120 燃气轮机

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.035 据《Gas Turbine World》2014 年 9 - 10 月刊报道, PW Power Systems 推出了高效的航改型 FT4000 SP60 和

SP120 快装式发电机组。

简单循环 FT4000 SP60 燃气轮机发电机组全套设备用于 50/60 Hz 运行。用天燃气作为燃料, FT4000 SP60 的额定输出功率为 61.2 MW, 效率为 40.4%。WC(湿压缩)方案可增加 15% 的输出功率。

额定参数	F14000 SP60	WC方案
湿压缩方案	无	有
总输出功率/kW	61 236	70 005
热耗率(低热值)/kJ・(kW・h) ⁻¹	8 492.3	8 306.3
效率1%	40.4	41.3
排气流量/kg•s ⁻¹	163.7	177.4
排气温度,℃	429.5	425
水流量/kg • s ⁻¹	3.6	4.7

航改型 FT4000 燃气轮约是 FT8 燃气轮机输出功率的两倍且燃烧效率提高约 15%。双发动机 FT4000 SP120 装置一个主要的运行优点是便于进行维修,在配对的燃气轮机发电机保持运行的情况下可以使另一 台燃气轮机停机,在 50% 装机功率下继续发电。

预先装配好并试验过的组件可以迅速地被安装在混凝土基础上。整个装置可以在现场交付的 10-12 周内被安装、交工试运转和投入运行。

(吉桂明 摘译)

favorable, the linear correlation coefficient is 0.973, and the heat loss coefficient is 1.693 W/($m^2 \cdot K$); the optimum temperature value of the collector is 180 °C, the energy efficiency is 0.15. Key words: two-axis sun-track, domestic parabolic trough receiver, PTC, thermal performance, energy efficiency

核电站硼回收处理系统蒸发塔放大效应研究 = Magnification Effect Study on Boron Recycling System's Evaporator of Nuclear Power Plant [刊,汉]LI Shu-zhou(Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou of Jiangsu, China, Post Code: 215000), WANG Teng-jiao, LU Jie, LIU Xia-jie (China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen of Guangdong, China, Post Code: 518124) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4). - 628 - 631

By studying the similar principle of device model testing the transfer process, aiming at the working condition of the boron recycling's evaporator system in nuclear power plant and the magnification effect of testing evaporator, the main parameters that affect gas-liquid phase contact process in the evaporator is analyzed and determined. Thus, the similarity criterion between the evaporator and the testing evaporator is put forward. According to the similarity criterion that put forward in this paper, it is used in the design of the testing evaporator the same plate structure parameters, testing medium, operating temperature and operating pressure of prototype tower. And this meets the magnification criterion Then, it is calculated that the diameter, backflow volume and steam flow of testing evaporator meeting the requirements of amplification are determined according to the remaining similarity criterion. The correctness and rationality of testing evaporator design is verified by analyzing the experimental results. **Key words**: nuclear power plant, boron recycling system, evaporator, magnification effect

垂直轴风力机叶片的流固耦合作用研究 = Study on Fluid-structure Interaction of a Vertical-axis Wind Turbine [刊,汉]SUN Fangjin, LIANG Shuang, FENG Xu (College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, China, Post Code: 123000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4). -632-638

Vertical-axis wind turbines are promising, but the lagging behind of study on fluid-structure interaction between wind and wind turbine blade has become one of the key factors limiting their application. Thus, fluid-structure interaction of a vertical-axis wind turbine blade is studied in the present work. To overcome the excessive distortion of fluid mesh in arbitrary Lagrange-Euler method, structural alike equations are introduced to manage the continual deformation of the fluid domain. Mesh nodal displacement is obtained through solving the structure analogous equations linked with fluid nodes, and fluid mesh nodes are updated as a result. Strongly coupled method is employed to solve the fluid and solid equations. The method is applied to analyze fluid-structure interaction of a vertical-axis wind turbine blade to study the blade aerodynamic characteristics. Aerodynamic characteristics are analyzed in de-tail. The study found that fluid-structure interaction between vortex and the blade imposed significant effects on the aerodynamic characteristics of the vertical-axis wind turbine blade. **Key words**: vertical-axis wind turbines, wind turbine blade, fluid-structure interaction, structure analogous equations, aerodynamic characteristics

松木屑 CO₂催化气化的实验研究 = Experimental Study on CO₂ Catalytic Gasification of Pine Sawdust [刊, 汉]YU Wei-jin, YING Hao, WANG Yan-jie, SUN Ning (Institute of Chemical Industry of Forest Products, CAF; National Engineering Lab for Biomass Chemical Utilization; Key and Open Lab of Forest Chemical Engineering, SFA; Key Lab of Biomass Energy and Material, Jiangsu Province, Nanjing, China, Post Code: 210042) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4). -639-645

The CO₂ catalytic gasification of pine sawdust was studied by fixed-bed reactors and thermal gravimetric analysis. The results showed that: (1) Increasing the temperature and adding CaCO₃ and K₂CO₃ catalyst helped increasing gas production, reducing the yield of liquid and solid production; but when the temperature reached 950 $^{\circ}$ C, the trend of gas production gradually weakened, instead, the liquid yield slightly increased and the production of solid slowly decreased. The gas was mainly composed of CO and CO₂, followed by H₂ and CH₄, and other gases such as C₂H₆, C₂H₄ and C₂H₂, but the content was low. (2) Increasing the temperature and adding CaCO₃ catalyst was benefit for tar cracking and reducing the component of tar, however, adding K₂CO₃ catalyst increased the component of tar. (3) Adding CaCO₃ catalyst, the solid product has not been seriously damaged, but the surface of the solid product containing more CaCO₃, formation of the active centers, promoting the reaction of CO₂ with pine sawdust. Adding K₂CO₃, the solid product was significantly damaged, K₂CO₃ infiltration to pine sawdust in catalytic, with C forming KCK intercalated structure, promoting pine sawdust and CO₂ response. **Key words**: Pine sawdust, TGA (Thermogravimetric Analysis), CO₂, catalyst, gasification