计及动态失速和有限展弦比的立轴风力机气动分析*

刘占芳　颜世军　张　凯　邓智春
（重庆大学资源及环境科学学院，重庆 400044）

【摘要】 结合 Darrieus 立轴风力机运行时叶片非定常气动特性，对 B－L 动态失速模型进行了适当修正。考虑叶片有限展弦比效应和叶尖气动损失，修正了等截面叶片的气动性能。基于 DMST 气动评价方法，给出了考虑动态失速和有限展弦比效应的 Darrieus 立轴风力机气动性能计算模型。对 Sandia 实验室 17 m 风力机进行了气动评价，分析了动态失速与有限展弦比对叶片气动特性的影响，与实测的功率和功率系数的对比表明，该模型能较好地预测 Darrieus 立轴风力机的气动性能。

关键词：立轴风力机　气动性能　双向多流管模型　动态失速　有限展弦比
中图分类号：TK83　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)02-0120-06

Aerodynamic Performance Prediction for Darrieus Wind Turbine in View of Dynamic Stall and Finite Aspect Ratio Effects

Liu Zhanfang　Yan Shijun　Zhang Kai　Deng Zhichun
(*College of Resource and Environmental Sciences*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

Abstract

Considering the unsteady aerodynamic characteristics of the vertical axis wind turbine (VAWT) blade at low speed ratios, the B－L dynamic stall model was modified. The finite aspect ratio effects and blade tip loss were taken into account to modify the aerodynamic characteristics for constant chord blade. Based on the double-multiple stream tube method (DMST) in aerodynamic analysis, an improved aerodynamic performance prediction model for VAWT was developed combining with the dynamic stall model and predicting method for the effects of finite aspect ratio. The aerodynamic performance of 17 m VAWT by Sandia National Laboratory was calculated. The effects of the dynamic stall and finite aspect ratios were analyzed, and the rotor power and power coefficients were compared and analyzed between the test and evaluation results. Feasibility of the prediction model to evaluate the aerodynamic performance for VAWT was proved.

Key words　Vertical axis wind tubine, Aerodynamic evaluation, Double-multiple stream tube method, Dynamic stall, Finite aspect ratio

引言

风轮的气动性能评价和气动载荷预测，是风电机组设计的理论基础和首要问题。以流管动量理论为基础，从 20 世纪 80 年代开始发展了用于 Darrieus 立轴风力机气动性能分析的双向多流管模型(DMST)及改进模型[1~2]，这些模型广泛应用于立轴风力机的气动分析和设计。

Darrieus 风力机运行时，叶片截面翼型攻角和相对风速随方位角在不断变化，特别是在低尖速比区，这种变化相当剧烈，采用流管模型进行风力机气动评价时必须考虑叶片动态失速效应，动态失速特性的准确评价成了 Darrieus 风力机气动研究领域的重点和难点。评价翼型动态失速的方法主要有以

收稿日期：2010－03－10　修回日期：2010－06－30
* 重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC2008AC3105)
作者简介：刘占芳，教授，博士，主要从事风力机空气动力学、结构动力学和冲击动力学研究，E-mail：zhanfang@cqu.edu.cn

N－S 方程为基础的 CFD 方法[3~4]、基于面元法与边界层理论的粘性和无粘性耦合算法[5]以及基于实验数据建立起来的半经验模型[6]。前两种方法在风力机气动研究领域越来越得到重视，但是计算过程复杂且在绕流流动转捩和分离等方面的预估尚存不足；而半经验的动态失速模型表达简洁，计算效率高且能较好地捕捉动态失速效应，广泛应用于风力机气动设计领域。从绕流的流动状态出发，Beddoes 和 Leishman[7~8]等提出和发展了针对直升机叶片动态失速的 B－L 模型，Øye[9]和 Hansen[10]在 B－L 动态失速模型的基础上，结合水平轴风力机运行时的气动特性对该模型进行了简化和改进。此外，基于 DMST 的风力机气动性能分析均以二维翼型气动数据为基础，对于实际的风力机叶片，叶尖附近的二次流动将导致叶尖损失[11]，尾涡对叶片绕流诱导出下洗速度，导致诱导阻力的产生，因此，有限展弦比效应也是影响立轴风力机气动评价的重要因素。

本文在 DMST 模型的基础上，结合修正的 B－L 动态失速模型和以普朗特有限翼展理论为基础的有限展弦比效应评价方法，给出用于立轴风力机气动分析的计算模型。对 Sandia 实验室 17 m 风力机进行气动评价，分析翼型动态失速和叶片有限展弦比效应对风力机气动性能的影响，并与实测数据进行比较分析。

1　立轴风力机气动性能评价模型

1.1　双向多流管模型

DMST 模型假设有多个互相独立的流管穿过风轮，在立轴风力机叶片的干涉下，每根流管划分为上盘面和下盘面两部分（图 1），应用动量定理及伯努利方程，定义诱导速度因子，流管内各部分流速表示为

$$\begin{cases} U = (1-a)U_\infty \\ U_e = (1-2a)U_\infty \\ U' = (1-a')(1-2a)U_\infty \\ U'' = (1-2a')(1-2a)U_\infty \end{cases} \tag{1}$$

诱导速度因子 $a = 1 - U/U_\infty$，$a' = 1 - U'/U_e$。

由风轮外形和叶素相对于风速的关系（图 2），可得攻角 α、相对速度 W 与当地风速 U、风轮转速 ω、方位角 θ 和叶素倾角 β 的关系，对上盘面

$$\sin\alpha = \frac{U\sin\theta\cos\beta}{\sqrt{(\omega r + U\cos\theta)^2 + U^2\sin^2\theta\cos^2\beta}} \tag{2}$$

$$W^2 = (\omega r + U\cos\theta)^2 + (U\sin\theta\cos\beta)^2 \tag{3}$$

式中　r——叶素到风轮转轴的距离

结合叶素的受力关系，考虑流管内流体动量的变化与叶素流经流管时动量的变化相等，可得诱导速度因子 a 的迭代式

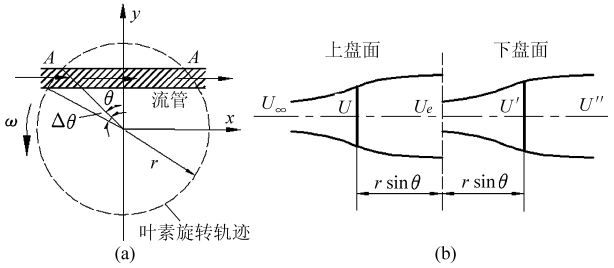

图 1　双向多流管模型中流管速度关系

Fig. 1　Sketch of stream tube velocities in DMST

（a）流管二维视图　（b）流管 $A-A$ 双盘驱动模型

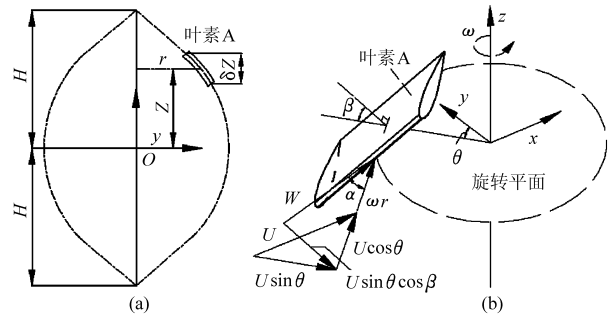

图 2　风轮外形与叶素速度关系

Fig. 2　Sketch of rotor shape and blade element velocities

（a）风轮外形　（b）叶素 A

$$a(\theta) = \frac{f(\theta)}{1+f(\theta)} \tag{4}$$

其中　$f(\theta) = \dfrac{Nc}{8\pi r}\left(\dfrac{W}{U}\right)^2\left(C_N\sin\theta - C_T\dfrac{\cos\theta}{\cos\beta}\right)\dfrac{1}{|\sin\theta|}$

式中　N——风轮叶片数　　c——翼型弦长

C_N、C_T——法向力系数和切向力系数

求解 a 可得相对速度和攻角，通过计算叶素在不同方位角和高度下的气动载荷，可得风轮的功率为

$$P = \frac{N}{N_T}\sum_{i=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_b}\frac{1}{2}\rho W^2\frac{c\delta Z}{\cos\beta}C_T r\omega \tag{5}$$

式中　N_T、N_b——叶片旋转一周所划分的份数以及单个叶片叶素数

ρ——空气密度

1.2　动态失速效应评价模型

Beddoes 和 Leishman 根据翼型绕流的流动特性对气动载荷的影响建立了二维 B－L 动态失速模型。考虑马赫数、雷诺数、减缩频率等对翼型非定常流动特性的影响，模型将绕流分解为附着流、分离流和深度失速涡 3 个部分：非稳态附着流特性通过叠加尾涡影响下的环流升力和基于活塞理论求得的脉冲载荷求解；对于前缘分离引起的深度失速涡，其产生的升力由非定常环流升力和分离流升力之差决定。

对非稳态的分离流特性,分离流的影响主要表现为前缘压力响应滞后和分离点位置延迟,对于前缘压力相对于法向力响应的滞后,通过引入一阶延迟函数求解

$$\frac{\mathrm{d}C'_N}{\mathrm{d}s}=\frac{C_N^p-C'_N}{T_P} \tag{6}$$

其中 $s=2Wt/c$

式中 C'_N——滞后法向力 C_N^p——环流升力

T_P——前缘压力滞后时间常数

s——无量纲时间

这样,对应于前缘压力响应滞后的有效攻角为 $\alpha_f(t)=C'_N(t)/C_{Na}(M)$,由有效攻角可以求得前缘压力响应滞后引起的动态分离点位置 f'。

当分离点在叶片表面移动时,相对于攻角存在延迟效应,同理,通过引入一阶延迟函数求解延迟的动态分离点位置 f''

$$\frac{\mathrm{d}f''}{\mathrm{d}s}=\frac{f'-f''}{T_f} \tag{7}$$

式中 T_f——对应于流动分离延迟的时间常数

由 Kirchhoff 气流模型可得法向力系数、切向力系数与分离点位置 f 的关系为

$$C_N=C_{Na}(M)\left(\frac{1+\sqrt{f}}{2}\right)^2(\alpha-\alpha_0) \tag{8}$$

$$C_T=C_{Na}(M)\sqrt{f}(\alpha-\alpha_0)\alpha \tag{9}$$

式中 $C_{Na}(M)$——法向力系数线性段斜率

α_0——零升攻角

B-L 模型往往针对叶片攻角为 -10°~30°时对气动载荷进行计算,对分离点位置与攻角的关系通过函数拟合的方式求得,而 Darrieus 风力机运行时攻角的变化范围大,运用 Kirchhoff 分离流理论时需要给出全攻角范围内分离点位置。

本文通过引入中间变量给出了全攻角范围内分离点位置。对已知不同雷诺数以及攻角下所对应的升、阻系数的翼型,Kirchhoff 理论得到的针对切向力和法向力系数的分离点位置不同,由式(8)、(9)分别求解法向力系数和切向力系数的对应分离点位置

$$f_N^{\frac{1}{2}}=4\sqrt{\frac{C_N}{C_{Na}(M)(\alpha-\alpha_0)}}-1 \tag{10}$$

$$f_T^{\frac{1}{2}}=\frac{C_T}{C_{Na}(M)(\alpha-\alpha_0)\alpha} \tag{11}$$

根据实验数据,在攻角为 ±90°附近,对式(10)和(11)进行求解时,右端项将出现负值,直接对其进行平方运算会导致其数值符号改变,为此引入中间变量

$$t_N=4\sqrt{C_N/[C_{Na}(M)(\alpha-\alpha_0)]}-1$$

$$t_T=C_T/[C_{Na}(M)(\alpha-\alpha_0)\alpha]$$

代入式(10)和(11)有

$$f_N=t_N^2\mathrm{sign}(t_N) \tag{12}$$

$$f_T=t_T^2\mathrm{sign}(t_T) \tag{13}$$

相应地,全攻角范围内的 Kirchhoff 气流模型修正为

$$C_N=C_{Na}(M)\left[\frac{(1+\sqrt{\mathrm{abs}(f)})\mathrm{sign}(f)}{2}\right]^2(\alpha-\alpha_0) \tag{14}$$

$$C_T=C_{Na}(M)\sqrt{\mathrm{abs}(f)}\mathrm{sign}(f)(\alpha-\alpha_0)\alpha \tag{15}$$

式(14)和(15)建立了全攻角范围内分离点位置和攻角的一一对应关系,通过数值求解式(6)和(7)可得动态分离点位置 f'',将其代入式(14)和(15)可得到非稳态分离流下的气动特性。

1.3 有限展弦比效应

对于具有有限展弦比的风力机叶片,其旋转产生的尾涡对叶片绕流的诱导速度分为沿叶片展向的速度分量以及相对于叶片的下洗速度分量。

对于沿叶片展向的速度分量,Willmer[12] 以普朗特叶尖损失评价模型为基础,提出了计算立轴风力机叶片叶尖损失效应的损失系数

$$F=\frac{U_e}{U}=\frac{2\arccos(\mathrm{e}^{-\pi\eta/\gamma})}{\pi} \tag{16}$$

其中 $\eta=H-|Z|$

式中,H 为风轮半高度,Z 为相对风轮赤道中心的流管高度。上盘面,$\gamma=\dfrac{\pi U_e}{N\omega}$;下盘面,$\gamma=\dfrac{\pi U''}{N\omega}$。

考虑尾涡对叶片绕流流速的影响,结合双向多流管理论,式(2)和(3)修正式为

$$\sin\alpha=\frac{FU\sin\theta\cos\beta}{\sqrt{(\omega r+U\cos\theta)^2+F^2U^2\sin^2\theta\cos^2\beta}} \tag{17}$$

$$W^2=(\omega r+U\cos\theta)^2+(FU\sin\theta\cos\beta)^2 \tag{18}$$

由普朗特有限翼展理论,对于等截面叶片绕流的下洗速度分量,在展弦比较大的情况下,可假设环量沿叶片呈椭圆形分布。已知叶片展弦比 λ 和翼型二维状态下的升力、阻力系数 C_L、C_D,求得有限展弦比叶片在尾涡作用下的升力、阻力系数 C_{Lf}、C_{Df} 为

$$C_{Lf}=\frac{C_L}{1+C_{La}/(\pi\lambda)} \tag{19}$$

$$C_{Df}=C_D+C_{Lf}^2/(\pi\lambda) \tag{20}$$

式中 C_{La}——升力曲线斜率

该修正方案由线性的升力线理论导出,是对叶片的附着流特性进行的修正;当叶片发生动态失速时,分离流的影响起主导作用,这时不对升力、阻力系数进行修正。

2 立轴风力机气动评价及分析

基于 DMST 气动评价模型,应用上述有限展弦

比效应评价方法对低攻角下的叶片气动特性进行修正，根据实验数据生成分离点位置数据库，采用修正的 B－L 动态失速模型计算叶片的非定常气动特性，并考虑雷诺数的变化和风剪效应的影响，编制了针对 Darrieus 立轴风力机叶片及风轮气动性能分析的数值计算程序。

2.1　风轮外形及风况参数

利用上述考虑动态失速和有限展弦比效应的气动评价模型，对 Sandia 实验室 17 m 高的立轴风力机进行气动评价。不同雷诺数下翼型 NACA0012 的气动特性数据和动态失速模型的经验常数可参考研究报告[13～14]。表 1 为该风力机的结构参数和风况参数[15]。

表 1　风力机参数及风况参数

Tab. 1　Parameters of rotor shape and wind conditions

参数	数值
风轮叶片翼型	NACA0012
风轮直径/m	16.73
风轮高度/m	17.0
风轮中心高度/m	13.376 8
扫风面积/m^2	187.1
叶片数目	2
叶片弦长/m	0.533 4
风轮实度	0.14
空气密度/$kg\cdot m^{-3}$	1.001 2
风切变指数	0.1
空气运动粘度/$m^2\cdot s^{-1}$	1.79×10^{-5}

2.2　气动评价结果及分析

为计及动态失速和有限展弦比效应对立轴风力机叶片截面翼型气动特性以及叶素受载的影响，下面考察在不同工况下，采用本文的气动评价模型对 Sandia 实验室 17 m 立轴风力机的气动性能进行分析，并与实测数据加以比较。

图 3 表示了风轮赤道中心在不同尖速比 X_{eq} 下叶片旋转一周时攻角随方位角的变化关系，图中可见尖速比越低，攻角的变化范围越大，尖速比小于 3 时攻角的变化幅值已远远超过了静态失速角。图 4 给出了在风轮赤道中心尖速比 $X_{eq}=3.24$ 时，升力系数和切向力的动态失速效应，表明风轮旋转时叶片截面翼型的失速角相对于稳态时出现了明显的滞后，动态失速时最大升力系数远高于稳态值。动态失速造成叶素的气动载荷相对于稳态有滞后效应，总体上提高了叶片的气动效率。

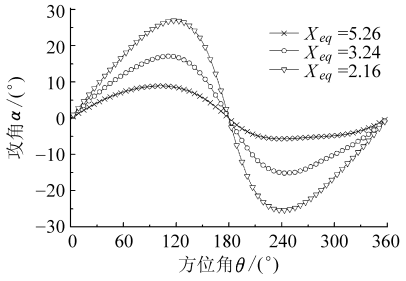

图 3　攻角与方位角的关系

Fig. 3　Attack angle *vs* azimuth angle

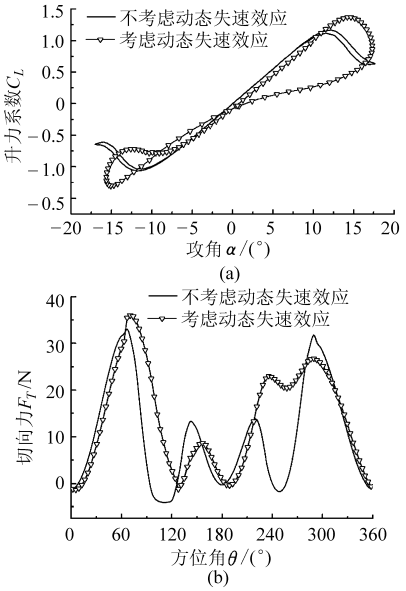

图 4　动态失速对升力系数和切向力的影响

Fig. 4　Effects of dynamic stall on lift coefficients and tangential force of blade element

（a）升力系数　（b）切向力

图 5 给出了风轮赤道中心尖速比 $X_{eq}=5.26$

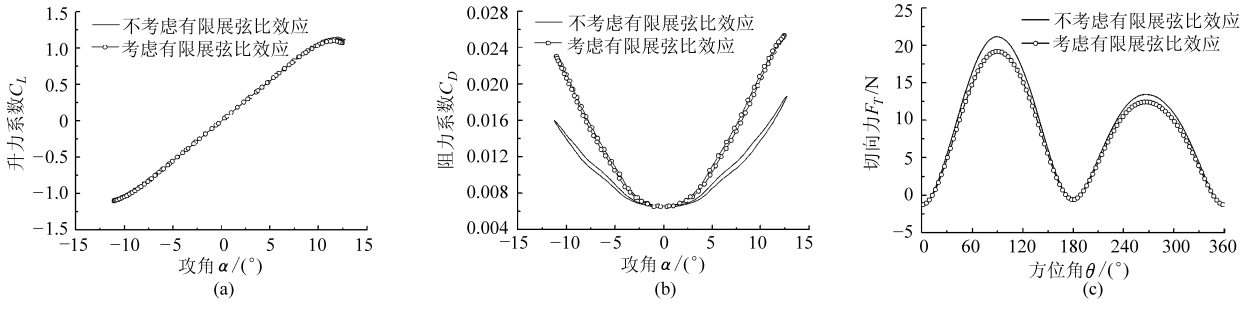

图 5　有限展弦比对升阻系数和切向力的影响

Fig. 5　Effects of finite aspect ratio on the lift-drag coefficients and tangential force of the blade element

（a）升力系数　（b）阻力系数　（c）切向力

时,有限展弦比对叶片截面翼型升阻系数以及对风轮赤道处叶素切向力的影响。此时,尖速比较高而攻角变化较小,有限展弦比对升力系数的影响较小,对阻力系数的影响较大。有限展弦比效应对切向力的影响显示其降低了叶片的气动性能,因此,对立轴风力机进行评价时应考虑有限展弦比效应。

图 6 分别给出了风力机在转速为 37 r/min 和 42 r/min 两种工况下的功率曲线。考虑动态失速和有限展弦比效应时的预测结果总体上与实测数据更加吻合,修正的 B - L 模型较好地预测了高风速下的动态失速效应,考虑有限展弦比效应使低风速下模型的预测结果与实测值更为接近。尽管如此,由于立轴风力机低尖速比下攻角的变化范围大且十分剧烈,这时,B - L 动态失速模型对动态失速影响的评价会存在一定误差。同时,忽略风力机结构的附加阻力也会造成评价模型对功率的峰值估计过高。

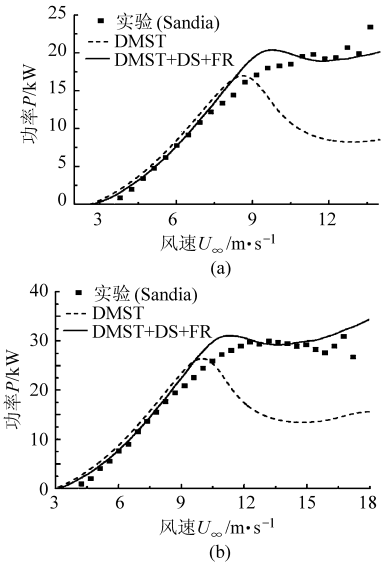

图 6 功率与风速关系

Fig. 6 Rotor power *vs* wind speed

(a) 转速 37 r/min (b) 转速 42 r/min

图 7 分别给出了转速为 37 r/min 和 42 r/min 时的功率系数与尖速比的关系,显然,考虑动态失速和有限展弦比效应的气动模型与实测数据更加一致。当尖速比较高时存在较大误差,这是因为在叶片干涉下,经过风轮上盘面后风的尾流变得非常复杂,流管之间的流体相互渗透,流管会严重膨胀。考虑流管动量理论及双向多流管成立的基本条件,此时用双向多流管模型评价风轮气动性能会产生一定的误差。

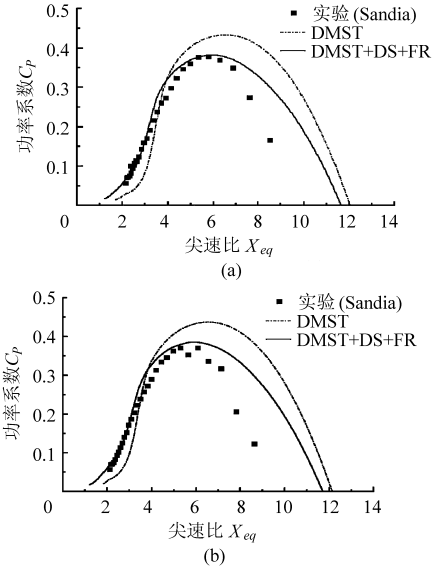

图 7 功率系数与尖速比关系

Fig. 7 Power coefficient *vs* tip speed ratio

(a) 转速 37 r/min (b) 转速 42 r/min

3 结束语

动态失速是 Darrieus 风力机低尖速比下运行时的必然结果,基于 Kirchhoff 气流模型,对叶片分离流特性,通过引入中间变量建立了全攻角范围内分离点位置的求解方法,修正了 B - L 动态失速模型。考虑叶片尾涡对叶片气动特性的影响,引入 Willme 叶尖损失系数,采用线性普朗特有限翼展理论对叶片低攻角下的气动特性进行了修正。在 DMST 评价方法基础上给出了计及动态失速和有限展弦比效应的 Darrieus 风力机的气动性能计算模型。

对 Sandia 实验室 17 m 风力机的气动分析表明,动态失速导致叶片气动载荷相对于稳态时出现延迟且总体上提高了低尖速比下叶片的气动载荷。高尖速比下有限展弦比效应对升力的影响较小,但提高了叶片的阻力从而降低了叶片的气动效率。与风力机实测功率及功率系数的对比表明,计及动态失速和有限展弦比效应的气动分析模型能够较好地预测风力机的气动性能。

参 考 文 献

1 Paraschivoiu I, Delclaux F. Double multiple streamtube model with recent improvements[J]. Journal of Energy, 1983, 7(3):250 ~ 255.

2 Mazharul I, David S K. Aerodynamic models for darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006,12(4):1 087 ~ 1 109.

3 Ferreira C J S, Bijl H, van Bussel G, et al. Simulating dynamic stall in a 2D VAWT: modeling strategy, verification and

validation with particle image velocimetry data[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2007,75:012023.

4 Nobuyuki F, Satoshi S. Observations of dynamic stall on darrieus wind turbine blades[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(2): 201 ~ 214.

5 Vasilis A R, Spyros G V. Dynamic stallmodeling on airfoils based on strong viscous-inviscid interaction coupling[J]. International Journal for Numerical Methods, 2007, 56(3):185 ~ 208.

6 Larsen J W, Nielsen S R. Dynamic stallmodel for wind turbine airfoils[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(7): 959 ~ 982.

7 Leishman J G, Beddoes T S. A semi-empirical model of dynamic stall[J]. Journal of American Helicopter Society, 1989, 34(3): 3 ~ 17.

8 Sandeep G, Leishman J G. Dynamic stall modelling of the S809 aerofoil and comparison with experiments[J]. Wind Energy, 2006, 9(6):521 ~ 547.

9 Øye S. Dynamic stall simulated as time lag of separation[R]. Department of Fluid-Mechanics, Technical University of Denmark, 1991.

10 Hansen M H, Gaunaa M, Madsen H A. A beddoes-leishman type dynamic stall model in state-space and indicial formulations[R]. Ris－R－1354(EN), Risø National Laboratory, Denmark, 2004.

11 吴子牛. 空气动力学[M]. 北京:清华大学出版社,2007:135 ~ 145.

12 Willmer A. Aerodynamic investigation into the feasibility of a 25 m vertical axis windmill[R]. Aero Rt. 124, BAe Filton, England, 1979.

13 Leishman J G, Beddoes T S. A generalised model for airfoil unsteady aerodynamic behaviour and dynamic stall using the indicial method[C]. Presented at the 42nd Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington DC, 1986.

14 Robert E S, Paul C K. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines[R]. SAND80－2114, Sandia National Laboratory, 1981.

15 Mark H W. Aerodynamic performance of the 17 meter diameter darrieus wind turbine[R]. SAND78－1737, Sandia National Laboratory, 1978.

(上接第 87 页)

6 Yang Xin, Feng Xiaojing. Virtual assembly associative design and finite element analysis for digging spade of potato harvester [C]// Proceedings of 2007 ICAE., Baoding, China, 2007.

7 贾晶霞, 刘汉武, 郝新明, 等. 马铃薯收获机挖掘铲有限元静力学分析[J]. 农业机械学报, 2006,37(9): 86 ~ 88.
Jia Jingxia, Liu Hanwu, Hao Xinming, et al. Finite element analysis for blade of potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 86 ~ 88. (in Chinese)

8 杨欣, 佟金, 陈东辉, 等. RFT 内支撑三维结构有限元静力学分析与改进设计[J]. 农业机械学报, 2008,29(1): 10 ~ 14.
Yang Xin, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Three-dimensional structural finite element analysis of run-flat tire insert[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 29(1): 10 ~ 14. (in Chinese)

9 姬长英, 尹文庆. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,1996.

10 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社,2007.

11 过小容, 吴洁. Autodesk inventor professional R9/10 培训教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

12 唐湘民. Autodesk inventor 有限元分析和运动仿真详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.