

## 风力机翼型阵风响应计算与分析

顾宁 陆志良 张家齐 郭同庆

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京, 210016)

**摘要:**基于网格速度方法,对阵风条件下风力机翼型运动的气动特性进行数值计算。中心格式有限体积法、双时间推进法求解预处理后的非定常N-S方程。计算结果表明:在弦向阵风作用下,翼型的运动能有效降低响应波动峰值,即弦向阵风对运动影响较小;而在法向阵风作用下,气动响应波动很大。计算翼型在不同参数阵风作用下的响应过程,阵风的频率变化对响应影响不大。弦向阵风的幅值增大,叶片运动对阵风响应峰值减缓效果增加;法向阵风的幅值增大1倍,响应峰值也增加1倍。

**关键词:**非定常流动;风力机;阵风响应;N-S方程

中图分类号:TK83

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0623-06

## Numerical Simulation and Analysis of Gust Responses for Wind Turbine Airfoil

*Gu Ning, Lu Zhiliang, Zhang Jiaqi, Guo Tongqing*

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Based on the field velocity method, numerical simulation is carried out for the flapping motion of one wind turbine airfoil, and the aerodynamic response of the airfoil on continuous sinusoidal gusty condition is calculated. The finite-volume method based on Jameson cell-centered scheme with artificial dissipation is applied to solve the pre-transformed two-dimensional N-S equations, and the dual-time stepping for multistage schemes is used for time marching. The study shows that the blade flapping with certain kinematics can effectively alleviate the fluctuation of horizontal gust response. The aerodynamic response fluctuates a lot under the vertical gust, while the horizontal gust rarely affects the flapping response. The effects of the parameters of horizontal and vertical gusts on the flapping airfoil aerodynamic performance are also calculated. It shows that the impacts of gust fluctuation frequency are insignificant in gust response. The alleviation is obvious when the horizontal gust amplitude is increased. The response fluctuation is doubled with the doubled amplitude of vertical gust.

**Key words:** unsteady flow; wind turbine; gust response; N-S equations

随着国内风力发电的广泛使用,风力发电机正朝着大型化方向发展。阵风、大气湍流、风剪切、偏航会对水平轴风力机叶片产生动载荷,使得叶片会产生振动和变形。由于风速和风向的不规则变化,

风对结构的作用力也是不规则的,容易导致结构的疲劳。这不但影响叶片的气动性能、结构强度和疲劳载荷,还会使叶片弯向塔架。在恶劣的环境下,强有力的阵风会导致叶片发生过大的变形,有可能打

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11-0170)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2011-04-29; **修订日期:**2011-07-13

**通讯作者:**陆志良,男,教授,博士生导师,1963年6月生, E-mail: luzl@nuaa.edu.cn。

到塔架发生事故。

传统的风力机阵风模拟使用的是概率统计方法<sup>[1]</sup>,而计算极端阵风载荷时必须使用确定的阵风信号,随着风力机大型化的发展,这种极端载荷的计算变得尤为重要,文献[2]采用有理数方法建立了极端阵风载荷模型,比较了随机阵风载荷和确定极端阵风载荷的结果。本文把风力机翼型的运动分解为沉浮和俯仰两部分,利用“网格速度”方法模拟阵风的影响,对确定阵风信号环境下的翼型运动进行数值模拟,分别计算了不同参数阵风作用下翼型运动的气动响应过程,得到的结果对风力机设计有一定参考价值。

## 1 CFD 计算方法

直角坐标系下二维 N-S 方程<sup>[3]</sup>预处理后的微分形式为

$$\mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \tau} + \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{W}$  为守恒变量; $\mathbf{f}, \mathbf{q}$  为对流量项; $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  为粘性通量项; $\mathbf{P}$  为预处理矩阵(具体形式见参考文献[4]);本文采用 Weiss-Smith 预处理方法,对方程(1)引入伪时间导数项进行预处理。采用带人工耗散项的 Jameson 中心格式以及双时间步长推进方法对 N-S 方程中的空间项和时间项分别进行了离散,并采用当地时间步长加速收敛。壁面处采用无滑移边界条件,远场边界处采用无反射边界条件。计算网格采用 C 型结构网格,计算网格在运动过程中的同步运动,通过弹性变形网格方法予以实现<sup>[5]</sup>。在计算阵风对运动影响时,采用网格速度方法,通过赋予网格速度实现不同形式阵风的模拟<sup>[6-7]</sup>。

## 2 翼型运动规律

### 2.1 运动参数定义

大型风力机叶片是细长体结构,可以简化为梁模型。叶片的振动是挥舞、摆振和扭转振动的组合,对应叶片翼型的沉浮、前行和俯仰运动。本文将翼型的运动简化为俯仰和沉浮的正弦运动,运动的表达式为

$$\begin{aligned} h(t) &= h_0 \sin(2\pi ft) \\ \theta(t) &= \beta + \theta_0 \sin(2\pi ft + \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $h(t)$  为沉浮运动; $\theta(t)$  为俯仰运动; $h_0, \theta_0$  分别为两种运动幅值; $\varphi$  为运动相位差; $\beta$  为平均迎角; $f$  为运动频率。对沉浮和俯仰运动通常有缩减频率  $k$  和斯托哈尔数  $St$ , 分别定义为

$$k = \frac{2\pi fc}{U_0}, St = \frac{2kh_0}{\pi} \quad (3)$$

式中: $U_0$  为来流速度; $c$  为弦长。

### 2.2 算例验证

为验证流场求解器的有效性,本文计算了不同  $St$  数下 NACA0012 翼型的俯仰沉浮运动过程。运动规律如式(2)。式中: $h_0 = 0.75, \varphi = 75^\circ, \theta_0 = -15^\circ + \arctan(\pi St), \beta = 0^\circ$ ; 计算马赫数  $Ma = 0.03, Re = 1 \times 10^5$ , 俯仰中心在 1/3 弦长处。翼型运动产生平均推力系数和平均升力系数定义

$$\begin{aligned} C_{T\text{mean}} &= \frac{1}{T} \int -C_T dt \\ C_{L\text{mean}} &= \frac{1}{T} \int -C_L dt \end{aligned} \quad (4)$$

本文将不同  $St$  数下的计算结果分别与实验数据<sup>[4]</sup>和参考文献[8]中的结果进行对比,如图 1 所示。

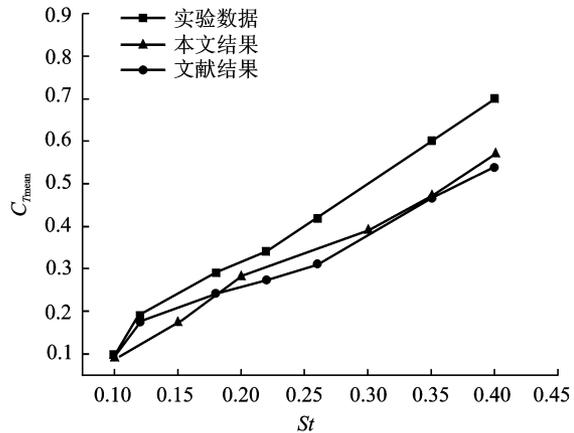


图1 不同  $St$  数下平均推力系数对比图

由图可见,随  $St$  数增加翼型运动推力系数变大,因为随着  $St$  数的增大,翼型俯仰运动幅值和运动频率增大,产生推力也相应变大。与实验数据相比,随  $St$  数增加,平均升力系数比实验数据偏小,这是由于在实验参考中翼型到远场只有 5 倍弦长距离,本文计算网格翼型到远场有 15 倍弦长距离。同时,本文平均推力系数与参考文献[8]中结果是基本吻合的,证明本文所用求解方法的正确性。

## 3 算例与分析

### 3.1 弦向阵风下的翼型运动响应

本文考虑的确定阵风信号为翼型弦向和法向上固定幅值与频率的连续阵风。弦向阵风的阵风形式为

$$U(t) = U_0(1 + A \sin(2\pi f_g t)) \quad (5)$$

式中: $f_g$  为阵风频率; $A$  为弦向阵风幅值。

计算单频率固定幅值的弦向阵风作用下翼型的运动响应过程。翼型按式(2)中的规律运动,运动参数为: $k=0.63, \theta_0=28^\circ, \beta=4^\circ, h_0=0.75, \varphi=75^\circ$ ,俯仰中心位于1/3弦长处;阵风幅值为来流的0.2倍,翼型运动频率是阵风频率的7.4倍,雷诺数取 $4 \times 10^4$ 。一个阵风周期( $T_g$ )内运动响应的计算结果如图2~5。

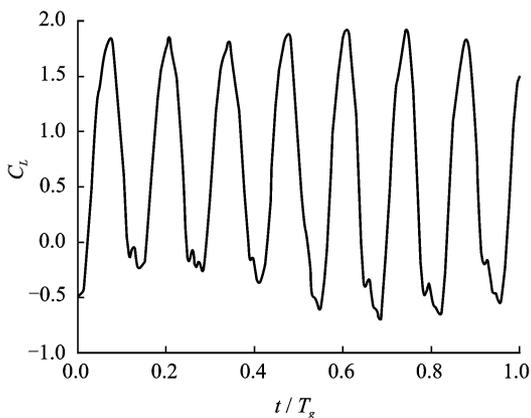


图2 阵风周期内升力系数响应图

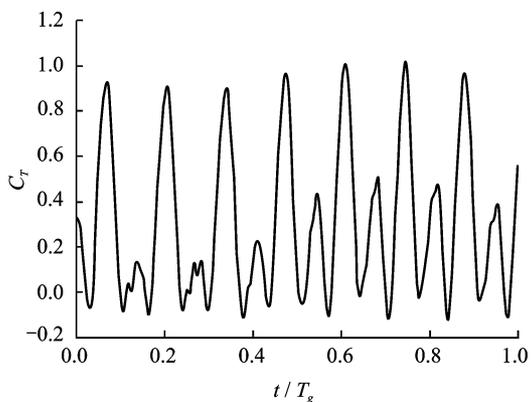


图3 阵风周期内推力系数响应图

图2,3为阵风周期内翼型运动升力系数和推力系数时间响应图,图4,5为阵风周期内每个运动周期的平均升力系数和推力系数响应图,与文献[9]中的结果基本吻合。可以看出,在一个阵风周期内升力系数随风速变化先增加后下降,而推力系数随风速变化先减小后增加,这是由于平均迎角存在,升力系数和推力系数响应在相位上有差别。图4,5中推力系数和升力系数波动幅值均在平均值的20%左右。通常气动力与来流速度平方成正比,阵风幅值 $A=0.2$ 应导致约44%的气动力变化(实线所示),但翼型运动的升力/推力系数响应波动却只有20%左右的变化量,说明在此种运动形式能明显地降低阵风响应峰值。

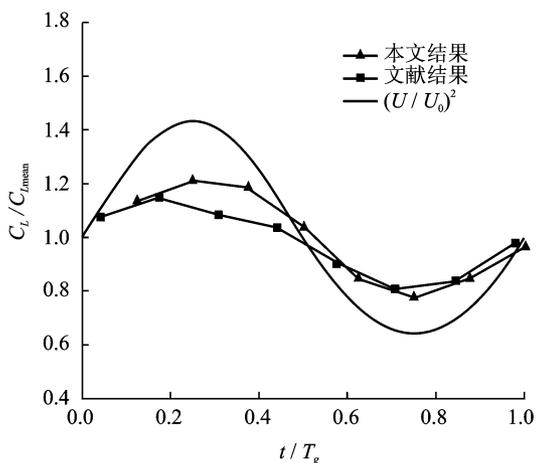


图4 阵风周期内平均升力系数响应图

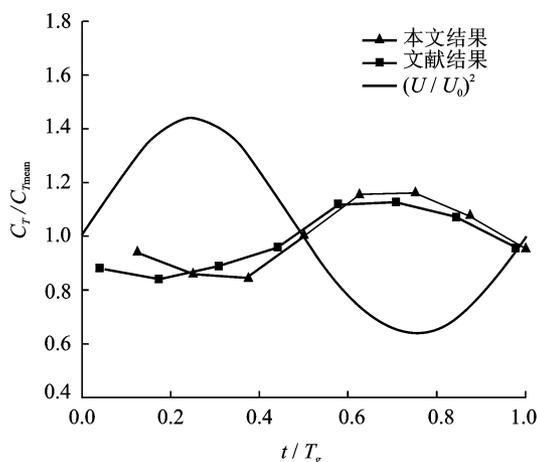


图5 阵风周期内平均推力系数响应图

本文同时计算了翼型运动参数变化对水平阵风响应影响。图6,7为在幅值 $A=0.2$ 作用下,运动参数 $k=0.63, \theta_0=8.4^\circ, \beta=4^\circ, h_0=0.75, \varphi=90^\circ$ 时阵风响应过程。

图6为 $\theta_0=8.4^\circ, \varphi=90^\circ$ 时升力系数响应过程,图7为此运动规律的平均升力系数响应图。从图中

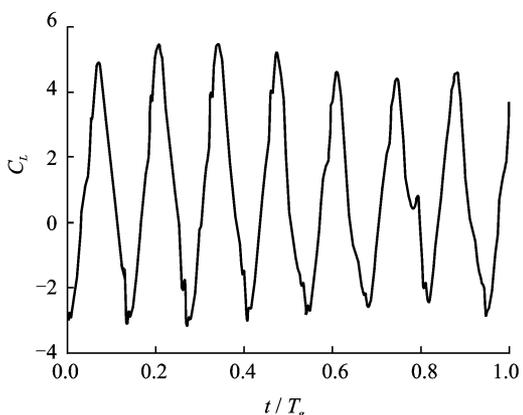


图6  $\theta_0=8.4^\circ, \varphi=90^\circ$ 时推力系数响应图

看出,响应波动减小不明显,幅值约35%,同 $\theta_0 = 28^\circ, \varphi = 75^\circ$ 时的比较阵风响应峰值变大。

以下研究运动参数 $k = 0.63, \theta_0 = 28^\circ, \beta = 4^\circ, h_0 = 0.75, \varphi = 75^\circ$ 时不同形式阵风对运动的影响,分别计算不同频率、幅值的水平阵风作用下的翼型运动响应过程。图8,9为幅值 $A = 0.4$ 的水平阵风响应计算结果,图10,11为不同频率水平阵风作用下运动响应计算结果。

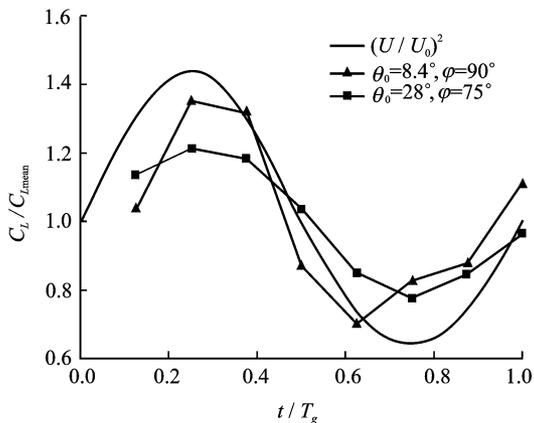


图7  $\theta_0 = 8.4^\circ, \varphi = 90^\circ$ 时平均推力系数响应图

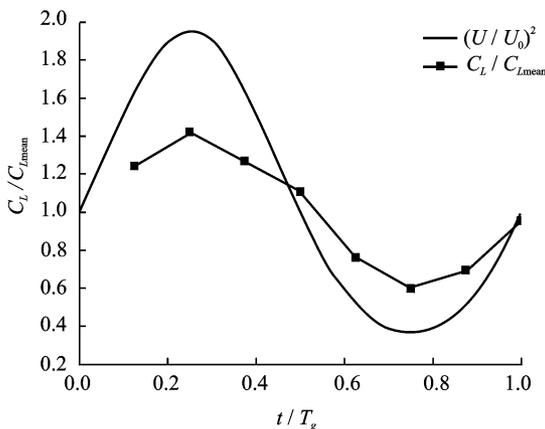


图8  $A = 0.4$ 时阵风周期内平均升力系数响应图

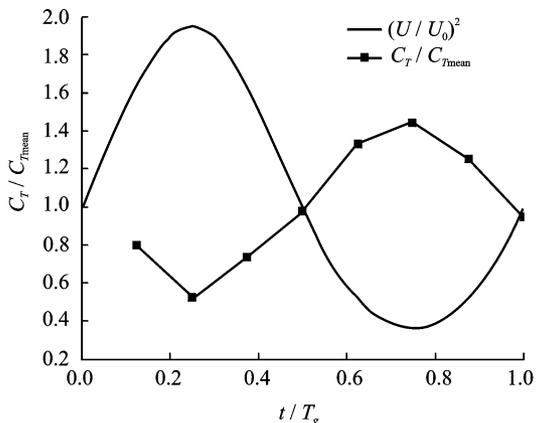


图9  $A = 0.4$ 时阵风周期内平均推力系数响应图

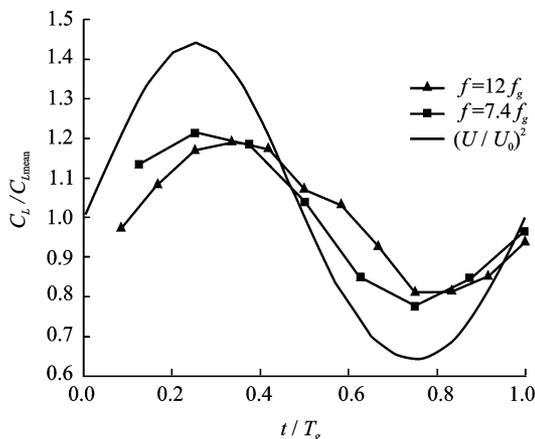


图10 不同频率阵风作用下平均升力系数响应图

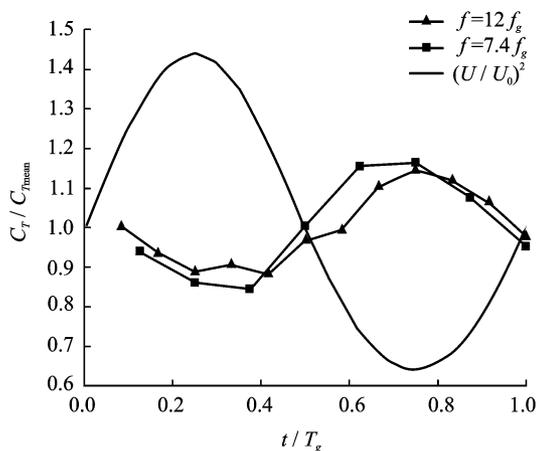


图11 不同频率阵风作用下平均推力系数响应图

图8,9为阵风周期内平均升力系数和推力系数响应过程。随阵风幅值增加,响应波动幅值约有40%波动变化,对阵风响应峰值减小50%左右。

图10,11为不同频率水平阵风作用下翼型运动的平均升力系数和推力系数时间响应过程,两种频率阵风作用下响应曲线幅值均在20%左右,响应曲线也近似一致,说明阵风频率的变化对翼型运动响应影响不明显。

### 3.2 法向阵风下翼型运动响应

当阵风为垂直于弦向的固定幅值和频率的连续阵风时,阵风形式可以写为

$$W(t) = W_0 \sin(2\pi f_g t) \quad (6)$$

式中 $W_0$ 为垂直阵风幅值。现计算在单频率固定幅值垂直方向阵风作用下,翼型运动的气动响应过程。翼型按式(2)中的规律运动,运动参数不变;阵风规律如式(6),计算马赫数 $Ma = 0.03, Re = 4 \times 10^4$ 。频率比为7.4,不同幅值垂直阵风下响应对比如图12,13。

图12,13所示为不同幅值垂直阵风作用下翼

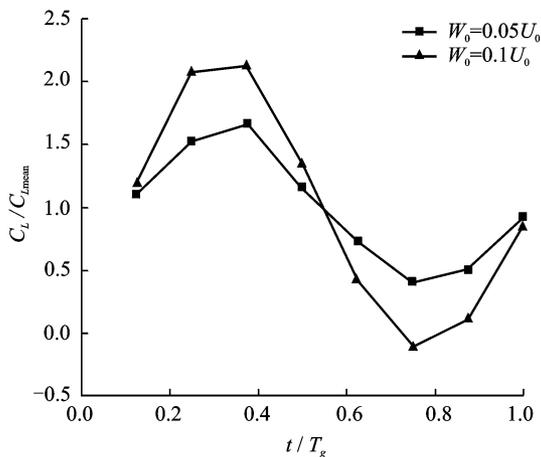


图12 不同幅值垂直阵风下平均升力系数响应图

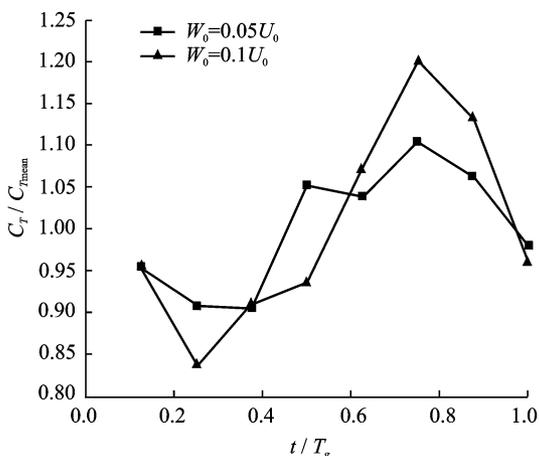


图13 不同幅值垂直阵风下平均推力系数响应图

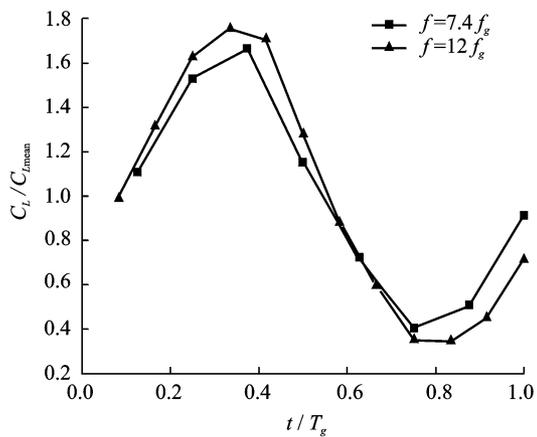


图14 不同频率垂直阵风下平均升力系数响应图  
( $W_0 = 0.05 U_0$ )

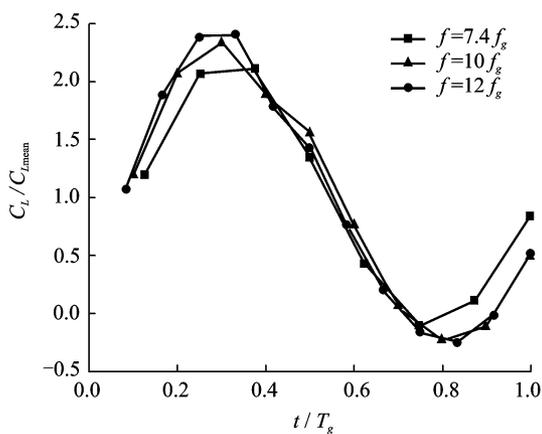


图15 不同频率垂直阵风下平均升力系数响应图  
( $W_0 = 0.1 U_0$ )

型运动平均升力系数和推力系数时间响应过程。可以看出,随阵风幅值增加,响应相位变化是近似一致的,但大幅值阵风作用下升力系数和推力系数响应峰值增加约1倍。翼型运动在不同幅值垂直阵风作用下响应变化很大,运动对垂直阵风幅值比较敏感。

现在计算法向阵风频率对结果的影响,分别计算了两种幅值阵风的频率发生变化时响应过程,计算结果如图14,15所示。

图14为阵风幅值 $W_0 = 0.05 U_0$ 时两种频率阵风作用下升力系数响应对比图,计算结果基本一致,只是在峰值处稍微有所不同,运动频率为12倍阵风频率升力响应曲线比7.4倍频率响应曲线峰值处高0.1左右。图15中阵风幅值 $W_0 = 0.1 U_0$ 下3种频率阵风响应结果同样是一致的, $f = 10 f_g$ 和 $f = 12 f_g$ 的阵风升力响应是完全吻合的。综合两图可以看出,法向阵风的频率变化对运动影响很小。

力系数波动很大。垂直阵风的幅值变化时,运动响应峰值波动比较剧烈;当垂直方向阵风频率发生变化时,对结果没有明显影响。

## 4 结 论

对风力机翼型在连续阵风影响下的气动特性进行研究,分别计算了弦向连续阵风和法向连续阵风作用下的响应过程。大型风力机叶片是细长体结构,翼型的计算结果能反映出实际叶片的响应过程,计算结果表明:

(1)在弦向阵风作用下叶片的运动能有效降低响应波动峰值,即弦向阵风对叶片运动影响较小;而在法向阵风作用下,气动响应波动很大。

(2)叶片受到不同频率的弦向和法向阵风影响时,阵风频率对响应结果影响不大。

(3)弦向阵风的幅值增大,叶片运动对阵风响应峰值减缓效果增加;法向阵风的幅值增大1倍,

综上所述,翼型受到垂直方向阵风作用时,升

叶片运动响应波动变化剧烈,峰值增加1倍左右。

#### 参考文献:

- [1] Bierbooms W, Cheng P W. Stochastic gust model for design calculations of wind turbines [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(1): 1237-1251.
- [2] Cheng P W, Bierbooms W. Distribution of extreme gust loads of wind turbines [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(3/4): 309-324.
- [3] 郭同庆. 复杂组合体跨音速非定常气动力和颤振计算 [D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2006.
- [4] 田书玲. 基于非结构网格方法的重叠网格算法研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [5] Lu Zhiliang. Generation of dynamic grids and computation of unsteady transonic flows around assemblies [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(1): 1-5.
- [6] Parameswaran V, Baeder J D. Indicial aerodynamics in compressible flow-direct computational fluid dynamic calculation [J]. *Journal of Aircraft*, 1997, 34(1): 131-133.
- [7] 詹浩, 钱炜祺. 翼型和机翼阵风响应的数值模拟 [J]. *空气动力学学报*, 2007, 25(4): 531-536.
- [8] Young J, Lai J. Oscillation frequency and amplitude effects on the wake of a plunging airfoil [J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(10): 2042-2052.
- [9] Lian Yongsheng. Numerical study of a flapping airfoil in gusty environments [R]. AIAA 2009-3952, 2009.