

文章编号: 1000-4750(2013)01-0059-05

# 径向基函数应用于流固耦合分析初探

苏 波<sup>1</sup>, 石启印<sup>1</sup>, 钱若军<sup>2</sup>

(1. 江苏大学土木工程与力学学院, 镇江 212013; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 该文在径向基函数(radial basis function, RBF)及其插值函数研究基础上, 构建了基于 RBF 插值的流固耦合信息传递模型, 进一步通过程序编制, 在同济大学空间结构自动分析与设计软件—AADS 系统中实现了对任一时间步上的流固交互作用分析, 并得到与 ADINA 软件非常吻合的计算结果。算例分析表明: 径向基函数可作为一种有效的界面信息传递方法应用于对三维流固耦合问题的研究。

**关键词:** 流固耦合; 风工程; 信息传递; 径向基函数; 插值函数

中图分类号: TU311.3; O242.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0310

## PRELIMINARY STUDY ON THE USE OF RADIAL BASIS FUNCTION IN FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS

SU Bo<sup>1</sup>, SHI Qi-yin<sup>1</sup>, QIAN Ruo-jun<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the study of RBF and its interpolating function, an information transfer model of a fluid-structure interaction (FSI) is build using RBF interpolating function. By program development, the fluid structure interaction analysis of each time step is performed on the Space Structure Automatic Analysis and Design System (AADS) of Tongji University, and the result of AADS is very close to the result of ADINA software. The example analysis shows that RBF can be taken as an effective data exchange method and used to analyze a 3D FSI problem.

**Key words:** fluid-structure interaction; wind engineering; data exchange; radial based function; interpolation function

目前, 风工程领域研究焦点之一是: 通过对流固耦合理论的研究, 实现流固耦合分析, 以揭示结构在风作用下的精确动态响应, 提高抗风设计水平, 防止结构的重大灾难<sup>[1-2]</sup>。

由于风场与结构存在明确的耦合界面(风与结构的接触面), 因此可采用 CFD、CSD 对风场、结构依次求解, 然后根据界面信息传递理论和方法, 进行交互作用分析<sup>[3]</sup>。由于 CFD、CSD 采用不同的计算网格, 界面上流体、固体网格并不匹配, 因此进行风与结构交互作用分析时一个不可避免的问题是: 在满足界面运动学及动力学条件下, 流固之间的物理量如何在动态分析过程中保真、高效的进行传递。

根据研究思路的不同, 可将信息传递方法分为两大类: 整体插值法和局部插值法<sup>[4-5]</sup>。随着有限元技术的发展, 局部插值法被广泛研究: 如映射点插值法、加权余量法、常体积转换方法(CVT)及其改进方法(ICVT)、等参单元逆变换及其改进方法、约束反力分配法和投影插值法等<sup>[6]</sup>。局部插值法的特点是要根据界面拓扑信息及网格特征构建相应

收稿日期: 2011-05-18; 修改日期: 2011-10-17

基金项目: 国家青年科学基金项目(51108210); 江苏省六大人才高峰项目(2010-JZ-008); 江苏大学高级专业人才培养启动基金项目(10JJDG047)

通讯作者: 苏 波(1977), 男, 山东人, 讲师, 博士, 主要从事空间结构、流固耦合的研究(E-mail: davidsubo@yahoo.com.cn)。

作者简介: 石启印(1964), 男, 陕西人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事混凝土结构、风工程的研究(E-mail: shiqiyin@ujs.edu.cn);

钱若军(1945), 男, 上海人, 教授, 博导, 从事空间结构、流固耦合的研究(E-mail: prjqjt@yahoo.com.cn)。

的信息传递算法,目前商用软件(如 ADINA、ANSYS)多采用此方法,但局部插值法难以保证界面运动学及动力学约束条件,实际计算时往往导致收敛困难<sup>[7]</sup>。

整体插值法最早来源于航空领域中各种样条函数法的研究:如无限平板样条法(IPS)、薄板样条(TPS)、有限表面插值法(FPS)、MQ 法等。徐敏(2003)<sup>[8]</sup>证明以上方法只有在满足流体表面和结构表面一致的条件才能得到理想的结果。近些年来,基于径向基函数(Radial Basis Function)的整体插值算法在多领域中被用于大规模散乱数据的处理<sup>[9-10]</sup>。国外,Armin Beckert(2001)<sup>[11]</sup>最早利用 RBF 的多维插值特性以解决航空领域中的机翼变形问题。Rendall T C S(2008)<sup>[12]</sup>致力于对基于 RBF 的网格更新与信息传递的统一算法的研究。国内,苏波、韩向科等<sup>[13-14]</sup>推导了基于 RBF 的信息传递矩阵,并证明了该方法的有效性:它既不需要界面上的网格拓扑信息,同时避免了表面一致条件的限制。本文将在之前研究基础上,通过程序编制,在同济大学空间结构自动分析与设计系统(AADS)中初步实现了对三维工程流固耦合问题的分析,并将信息传递计算结果与 ADINA 软件计算结果进行了对比分析。

## 1 基于 RBF 插值的流固耦合信息传递模型

如图 1 所示,假定在欧拉坐标系( $o-xyz$ )中流固耦合界面为一空间平面,经过网格剖分后,流体域在流固接触面上有  $N_f$  个网格节点:

$$x_{fi}(x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}) \in R^3, \quad i=1, 2, \dots, N_f \quad (1)$$

固体域在流固接触面上有  $N_s$  个网格节点:

$$x_{sj}(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}) \in R^3, \quad j=1, 2, \dots, N_s \quad (2)$$

假定在流固接触界面上被传输的物理量为  $\mathbf{g}(g_x, g_y, g_z)$ , 则可建立如下两组数据:

1) 流体域在流固接触界面上的节点物理量及节点坐标

$$\mathbf{g}_{fi}, \mathbf{x}_{fi}(x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}), \quad i=1, 2, \dots, N_f \quad (3)$$

写成矩阵的形式:

$$\mathbf{g}_f = \begin{bmatrix} g_{f1} \\ g_{f2} \\ \vdots \\ g_{fN_f} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_f = \begin{bmatrix} x_{f1} \\ x_{f2} \\ \vdots \\ x_{fN_f} \end{bmatrix} \quad (4)$$

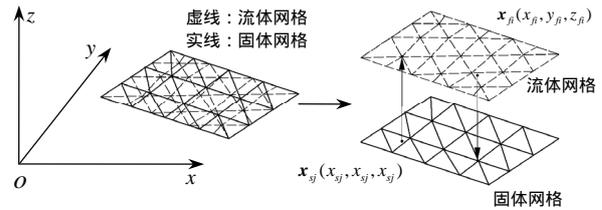


图 1 流固耦合界面上的有限元网格

Fig.1 Finite element mesh on FSI interface

2) 固体域在接触界面上的节点物理量及节点坐标:

$$\mathbf{g}_{sj}, \mathbf{x}_{sj}(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}), \quad j=1, 2, \dots, N_s \quad (5)$$

写成矩阵的形式:

$$\mathbf{g}_s = \begin{bmatrix} g_{s1} \\ g_{s2} \\ \vdots \\ g_{sN_s} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_s = \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ \vdots \\ x_{sN_s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

进行流固耦合分析时在流固接触面上存在如下两种信息传递途径:

1) 信息从固体域向流体域的传递,即已知流固接触面上固体网格节点坐标  $\mathbf{x}_s$ , 节点物理量  $\mathbf{g}_s$  以及流固接触面上流体的网格节点坐标  $\mathbf{x}_f$ , 求流固接触面上流体网格节点物理量  $\mathbf{g}_f$ 。可以按下式进行传递:

$$\mathbf{g}_f = \mathbf{H}_{sf} \mathbf{g}_s \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{H}_{sf}$  为流固接触面上固体域信息向流体域信息传递时的传递矩阵。

2) 信息从流体域向固体域的传递,即:已知流固接触面上流体网格节点坐标  $\mathbf{x}_f$ , 节点物理量  $\mathbf{g}_f$  以及流固接触面上固体的网格节点坐标  $\mathbf{x}_s$ , 求流固接触面上固体网格节点物理量  $\mathbf{g}_s$ 。可以按下式进行传递:

$$\mathbf{g}_s = \mathbf{H}_{fs} \mathbf{g}_f \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{H}_{fs}$  为流固接触面上流体域信息向固体域传递时的传递矩阵;  $\mathbf{H}_{sf}$ 、 $\mathbf{H}_{fs}$  可根据 RBF 插值函数数学性质导出,文献[13]给出了具体推导方法及步骤。

## 2 工程问题研究

### 2.1 AADS 系统及 FSI 模块介绍

AADS 系统是在同济大学钱若军教授主持下研制开发的,其主要功能是用于对各类空间结构的计算分析与设计,系统包括杆单元、梁单元和板壳单元等各类型的非线性单元,已实现对实际工程的静

动力分析。自 2005 年以来，项目组开始致力于对流体有限元算法及流固耦合问题的研究。笔者在对 RBF 插值算法研究基础上，通过程序编制，开发了 AADS 系统的 FSI 分析模块，其逻辑框图如图 2。目前，FSI 分析模块可实现任一时间步上的信息传递，其最终在服务于工程抗风设计，有赖于 AADS 系统流体有限元程序算法的进一步完善。

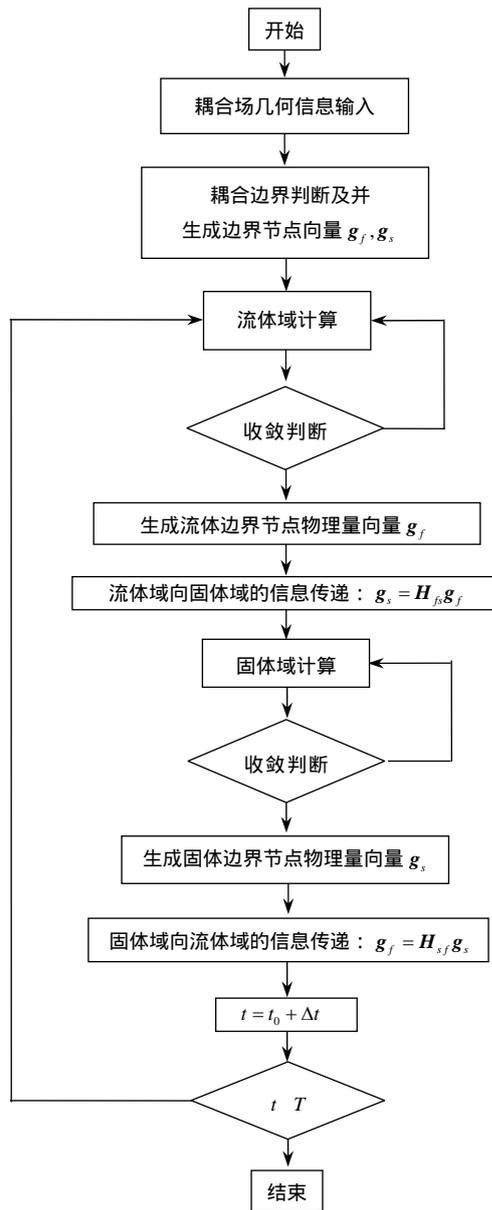


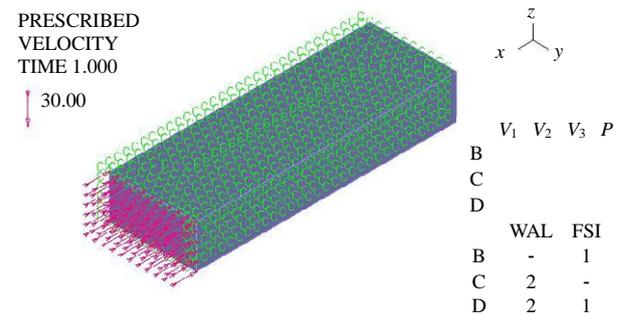
图 2 AADS 系统 FSI 模块逻辑框图

Fig.2 Sketcn map of FSI module of AADS system

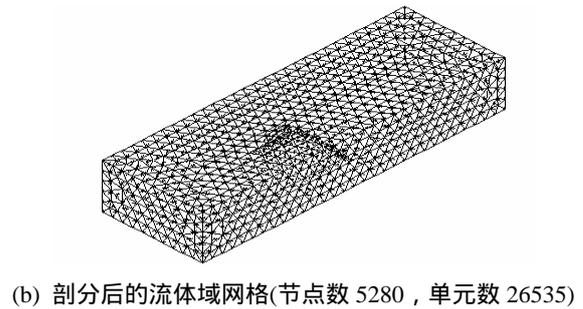
工程问题中的流固耦合界面信息通常具有较高的离散特征，为验证本文所提算法的适用性和精确性，以下通过工程算例分析，将 AADS 系统 FSI 模块的信息传递结果与目前成熟的流固耦合分析软件——ADINA 计算结果进行对比分析。

### 2.2 流固耦合分析模型

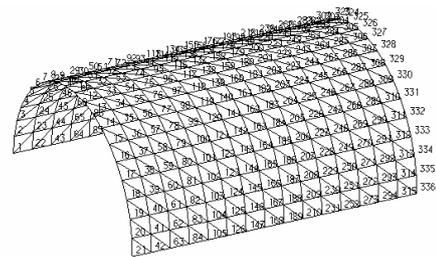
首先采用 ADINA 软件，建立一流固耦合分析模型。流场大小为  $51\text{m} \times 14\text{m} \times 12\text{m}$ ，内为粘性不可压流体，其密度为  $1.2\text{kg/m}^3$ ，粘性系数  $\mu = 2.0 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s/m}^2$ ，图 2(a)。流场近端入口的来流速度为  $30\text{m/s}$ ，远端为自由出口，其它面为壁面条件。流体域采用四面体 FCBI 单元进行模拟，剖分后的网格见图 3(b)。在流场中间底部位置有一半圆柱形壳体，其长宽高分别为： $10\text{m} \times 8\text{m} \times 4\text{m}$ ，弹性模量  $E = 6.9 \times 10^5 \text{N/m}^2$ ，泊松比  $\nu = 0.3$ 。采用三角形板单元进行模拟，考虑大应变小变形特性。固体有限元网格及节点号见图 3(c)。



(a) 流场及其边界条件



(b) 剖分后的流体域网格(节点数 5280，单元数 26535)



(c) 剖分后的固体域网格(节点数 336，单元数 600)

图 3 流固耦合分析有限元模型

Fig.3 Finite elemet mode of FSI analysis

### 2.3 ADINA 软件计算结果

采用 ADINA 软件中的 FSI 分析模块，可以对上述模型进行流固耦合作用分析，得到任一时刻流场及结构的响应。限于篇幅，这里仅给出  $t = 3.0$  时刻， $y = 0$  处剖面上  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向速度云图，见图 4。

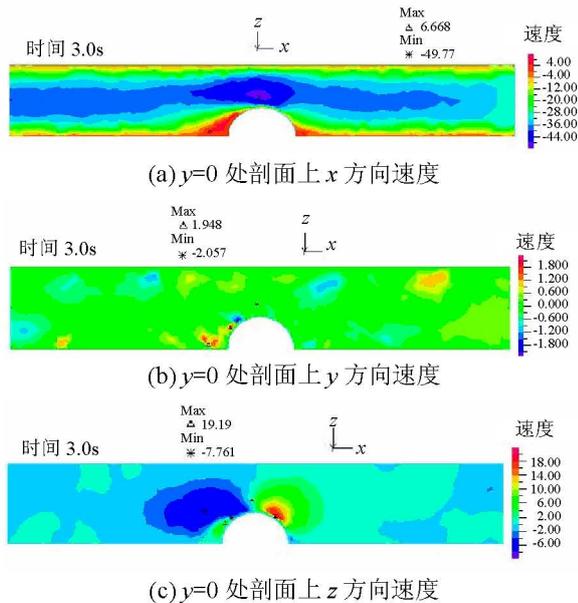
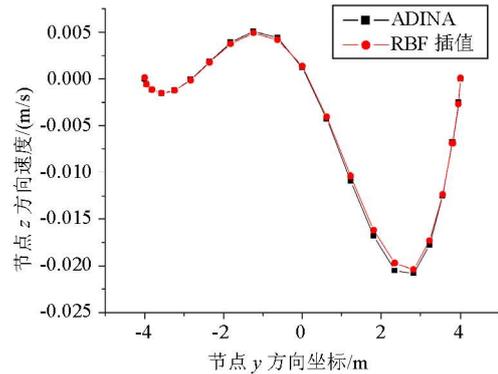
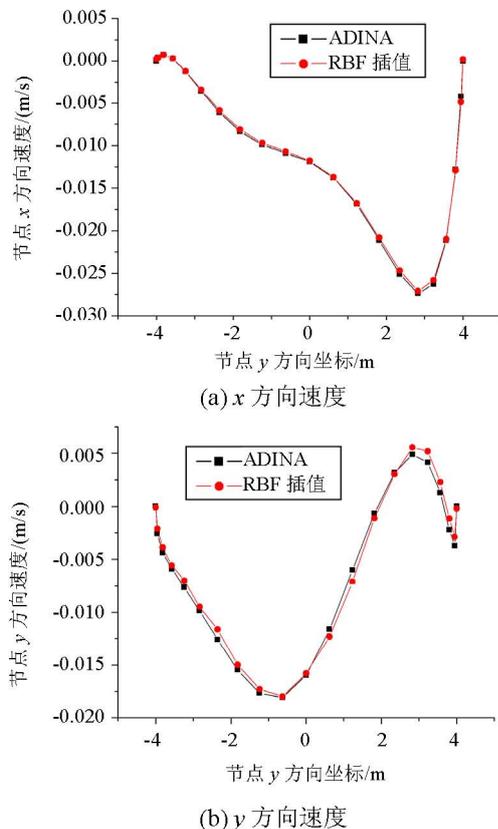
图4 ADINA 软件速度计算结果( $t=3.0s$ )

Fig.4 Velocity calculation result of ADINA software

## 2.4 AADS 系统计算结果

采用 AADS 系统 FSI 模块的信息传递功能, 将 ADINA 软件计算得到的  $t=3.0s$  时刻的流场速度场作为已知量, 并导入模型界面几何信息, 可计算得到耦合界面上的固体节点速度场。考察  $y=0$  截面上节点位移, 将 AADS 系统与 ADINA 计算结果进行对比, 见图 5。



(c) z 方向位移

图5 ADINA 和 AADS 速度计算结果对比

Fig.5 Comparison of velocity calculation results between ADINA and AADS

从图 5 可以看出 AADS 系统在  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向上的速度计算结果和 ADINA 比较吻合。而由于 AADS 系统采用了 RBF 插值算法, 信息传递不依赖界面网格的拓扑信息, 并能保证界面上信息传递的能量守恒, 从而解决了流固接触界面上不匹配网格间的位移、速度、压强等物理量的信息传递, 并具有较高的效率和精确度。

## 3 结论

本文利用 RBF 及其插值函数, 构建了基于 RBF 插值的流固交互作用信息传递模型。通过程序编制, 在同济大学空间结构自动分析与设计软件——AADS 系统的 FSI 分析模块中实现了对任一时间步上的流固交互作用分析, 得到与 ADINA 软件非常吻合的计算结果。本文的研究将推动径向基函数在流固耦合分析领域的应用。

## 参考文献:

- [1] 沈世钊, 武岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 1-9.  
Shen Shizhao, Wu Yue. Research progress on fluid-solid interaction effect of wind-induced vibration response of membrane structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 1-9. (in Chinese)
- [2] 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008, 4(1): 3-15.  
Qian Ruojun, Dong Shilin, Yuan Xingfei. Advances in research on fluid structure interaction theory [J]. Spatial Structures, 2008, 4(1): 3-15. (in Chinese)
- [3] ADINA R & D. ADINA theory and modeling guide - volume III: ADINA CFD & FSI [M]. Watertown: ADINA R & D, Inc, 2005: 229.
- [4] Bathe K J, Zhang Hong, Ji Shan hong. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions [J]. Computers & Structures, 1999, 72(1): 1-16.

- [5] 苏波, 钱若军, 袁行飞. 流固耦合界面信息传递理论和方法研究进展[J]. 空间结构, 2010, 16(1): 31-38.  
Su Bo, Qian Ruojun, Yuan Xingfei. Advances in research on theory and method of exchange on coupling interface for FSI analysis [J]. Spatial Structures, 2010 16(1): 31-38. (in Chinese)
- [6] 周岱, 李磊, 邓麟勇, 张夏萍. 流固耦合问题的网格更新与信息传递新方法[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 83-90.  
Zhou Dai, Li Lei, Deng Linyong, Zhang Xiaping. Novel methods for mesh update and data transfer technique of fluid-structure interaction [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 83-90. (in Chinese)
- [7] Wu Z M. The model, theory and method of scattered data approximation [M]. Beijing: Kexue Press, 2007: 134.
- [8] 徐敏, 史忠军, 陈士橧. 一种流体-结构耦合计算问题的网格数据交换方法[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(5): 532-535.  
Xu Min, Shi Zhongjun, Chen Shilu. A suitable method for transferring information between CFD and CSD grids [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(5): 532-535. (in Chinese)
- [9] Wu Jinming. A new approach for shape preserving interpolating curves [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2011, 61(5): 1425-1430.
- [10] Boyd J P, Gildersleeve K W. Numerical experiments on the condition number of the interpolation matrices for radial basis functions [J]. Applied Numerical Mathematics, 2011, 38(1): 75-84.
- [11] Armin Beckert, Holger Wendland. Multivariate interpolation for fluid-structure-interaction problems using radial basis functions [J]. Aerospace Science and Technology, 2001, 5(2): 125-134.
- [12] Rendall T C, Allen C B. Unified fluid-structure interpolation and mesh motion using radial basis functions [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 74(10): 1519-1559.
- [13] 苏波, 钱若军, 袁行飞, 于猛. 利用能量守恒和 RBF 插值的流固耦合界面数据传递方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 114-119.  
Su Bo, Qian Ruojun, Yuan Xingfei, Yu Meng. Data exchange method for fluid-structure interaction based on energy conservation and interpolation algorithm adopting radial basis function [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 114-119. (in Chinese)
- [14] 韩向科, 钱若军, 苏波, 袁行飞. 基于紧支径向基函数的流固交互作用数据传递[J]. 同济大学学报, 2011, 39(1): 48-52.  
Han Xiangke, Qian Ruojun, Su Bo, Yuan Xingfei. Data exchange method for fluid-structure interaction based on interpolation algorithm adopting compactly supported radial based function [J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(1): 48-52. (in Chinese)

(上接第 44 页)

- [13] Ma Jingmin, Ren Yongsheng, Tan Tao. Vibration characteristics of composite thin-wall beams [C]. Advanced Material Research. Civil Engineering Architecture and Building Materials. Haikou: Trans Technology Publication Limited, 2011, 250/251/252/253: 3993-4000.
- [14] Thomsen J J. Vibrations and stability: Advanced theory, analysis, and tools [M]. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2003: 112-126.
- [15] Meirovitvh L. Computational methods in structural dynamics [M]. Alphen aan den Rijn, The Netherlands: Sijthoff-Noordhoff, 1980: 178-192.
- [16] Hodges D H, Dowell E H. Nonlinear equations of motion for the elastic bending and torsion of twisted nonuniform rotor blades [R]. Washington District of Columbia: National Aeronautics and Space Administration, 1974.
- [17] 任勇生, 张明辉. 水平轴风力机叶片的弯扭耦合气弹稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 196-200.  
Ren Yongsheng, Zhang Minghui. Aeroelastic stability of a horizontal axis wind turbine blade with bending-torsion coupled [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 196-200. (in Chinese)