

考虑气动结构耦合的飞翼无人机嗡鸣振动

许 军¹, 马晓平²

(1. 西北工业大学航空学院, 西安, 710072; 2. 西北工业大学无人机所, 西安, 710065)

摘要 采用气动结构松耦合技术研究了飞翼布局无人机的方向舵嗡鸣响应及副翼、升降舵及襟翼的振动时域响应。首先建立较为详细的飞翼布局无人机的结构模型和气动模型, 基于雷诺平均的 N-S 方程建立流体控制方程和结构动力学方程的耦合求解技术; 气动计算中的网格变形技术采用非结构动网格, 其中动网格更新技术采用弹簧近似光滑和局部网格重构组合方法; 基于 LU-SGS 子迭代的时间推进技术和 HLLW 的空间离散方法进行气动数据的计算, 湍流模型采用 SST 湍流模型, 采用三维插值技术进行气动与结构耦合界面结构变形位移与气动力载荷之间数据的传递; 在方向舵转轴端部设置方向舵偏转运动的约束方程; 基于提出的气动结构松耦合方法计算飞翼无人机方向舵偏转引起的方向舵嗡鸣和全机的方向舵、副翼、升降舵及襟翼振动的时域响应; 并研究了旋转角频率参数变化对飞翼无人机全机振动响应特性的影响。研究表明旋转角频率对方向舵的偏转响应和副翼、升降舵及襟翼的振动响应频率影响较大。

关键词 飞翼无人机; 嗡鸣; CFD/CSD; 松耦合; 副翼; 振动

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.002

中图分类号 V221.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0006-05

Research on Flying Wing UAV Buzz Vibration Considering the Aerodynamic Structural Coupling Effects

XU Jun¹, MA Xiaoping²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. UAV Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Transonic rudder buzz responses and aileron, elevator, flap vibration time responses, are presented by adopting the CFD/CSD loosely coupled method for a tailless flying wing UAV. The RANS N-S equations and finite element methods are established based on the detailed aerodynamic and structural model, in which the aerodynamic meshes use the unstructured dynamic meshes based on the combination of the spring-based smoothing and local re-meshing methods. The LU-SGS iteration and HLLW space discrete methods based on the SST turbulence model are used to calculate the aerodynamic force. The interfaces between the structural and aerodynamic model are built with an exact match surface where load transferring is performed based on 3D interpolation. The constraints of the rudder motions are fixed at the end of the flying wing UAV structural model, and the structural geometric nonlinearities are also considered in the

收稿日期: 2015-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61074155); 陕西省自然科学基金(2013JM015)

作者简介: 许 军(1987-), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事无人机气动弹性研究. E-mail: xujun_0516@126.com

引用格式: 许军, 马晓平. 考虑气动结构耦合的飞翼无人机嗡鸣振动[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(3): 6-10. XU Jun, MA Xiaoping. Research on Flying Wing UAV Buzz Vibration Considering the Aerodynamic Structural Coupling Effects[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 6-10.

high aspect ratio flying wing UAV. Based on the presented buzz aerodynamic structural coupled method, the flying wing UAV transonic buzz responses and aileron, elevator, flap vibration time responses induced by the rudder motion are studied; the effects of rotating angular frequency on the vibration time responses are also given.

Key words: flying wing UAV; buzz; CFD/CSD; loose coupling; rudder; aileron; vibration

新型大展弦比无人机在飞行过程中面临流动分离、气动干扰使得结构和气动之间的相互耦合愈来愈复杂。国内外一些飞机和导弹在试飞中发生过嗡鸣,导致飞机结构破损^[1]。

Li Jie^[2]等研究了非定常气动力计算中变形风格技术;王军利^[3]研究了基于改进非结构网格计算了跨音速非定常绕流特性;安效民^[4]研究了映射推进技术在气动弹性中的应用;Rampurawsla^[5]研究了复杂结构的颤振计算,陈志敏^[6]研究了跨音速的静气动弹性响应;对于跨音速操纵面嗡鸣颤振的研究较少,刘千刚^[7]研究了嗡鸣的分叉特性及结构参数敏感度的影响;许军^[8]研究了飞翼无人机的嗡鸣气动弹性响应;杨国伟^[9]基于多块结构网格研究了副翼嗡鸣;张伟伟^[10]研究了控制面颤振特性。

国内外嗡鸣文献较少,且大多集中于标准算例的验证。本文以 CFD/CSD 松耦合技术为基础,建立飞翼无人机结构模型和气动模型,气动与结构交界面精确匹配,并选取三维插值进行界面载荷传递。

1 CFD/CSD 方法

气动结构耦合迭代方法目前工程计算较为通用松耦合技术,即分别独立求解结构动力学方程和气动控制方程,在耦合界面上进行结构变形位移和气动双向数据的传递,交错时间推进获得气动结构耦合计算响应。气弹问题基本方程为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F(t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \bar{Q} d\Omega + \iint_S (\bar{G} - \bar{Q} q_b) dS = \frac{1}{Re} \iint_S \bar{F}^V dS \quad (2)$$

$$\sigma_s n = -pn, u_s = u_F \quad (3)$$

式(1)为结构动力学方程;式(2)为积分形式的非定常 N-S 方程组;式(3)分别为交界面上的法向力平衡和位移相容条件。式中各符号定义,见文献^[1]。

2 飞翼无人机模型

飞翼无人机采用内、外翼飞翼布局,翼身高度融合,机身结构为半硬壳式的,由横向隔框、纵向肋及上下蒙皮构成;机身结构中共有 8 个框,4 根肋;内翼结构由壁板、大梁、翼肋组成,内翼有 4 根梁、6 个

肋,内翼后缘布置一个舵面为襟翼;前梁之前为前缘,前缘通过前梁缘条与主翼盒蒙皮搭接,后梁之后为舵面,外翼后缘共有 3 个舵面,从外向内依次是方向舵、副翼和升降舵;外翼肋包括普通肋和加强肋。无人机结构模型材料为 LY2024,无人机模型见图 1。飞翼无人机嗡鸣响应计算采用半模,细网格建模有利于气动结构数据的高精度耦合传递,CFD/CSD 耦合计算的耦合面包括机身、内翼、外翼、方向舵、副翼、升降舵和襟翼。

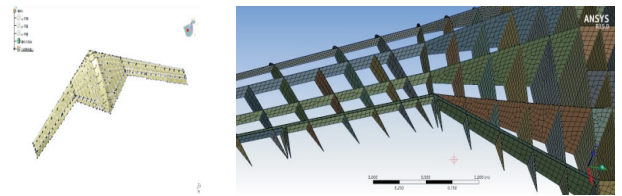


图 1 无人机结构模型

Fig.1 UAV Structural model

3 气弹分析

本节先计算 M6 机翼谐和振动的非定常气动力,其瞬间迎角方程是:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_m \frac{y}{s} \sin(\omega t) \quad (4)$$

计算条件 $Ma = 0.78$, 平均攻角 $\alpha_0 = 0^\circ$, 最大攻角为 $\alpha_m = 6^\circ$, 减缩角频率为 $k = 0.14$ 。图 2~3 分别给出了 65% 展向剖面处瞬间总升力系数 C_l 和瞬间总力矩系数 C_m 随瞬间迎角变化曲线和压力系数。

首先采用 CFD/CSD 松耦合方法计算飞翼无人机的气弹响应,计算状态为 $H = 6 \text{ km}$, $Ma = 0.82$, 气动结构耦合计算时间步长为 0.0001 s , 气动收敛误差为 $1e-6$, 基于雷诺平均的 N-S 方程模拟气动力, 湍流模型采用 SST 湍流模型, 采用基于 LU-SGS 子迭代的时间推进技术和 HLLW 的空间离散方法进行求解, 动网格技术采用弹簧近似光滑和局部网格重构方法。图 4 给出了外翼梢前缘点及不同舵面位置位移响应。从图中可看出各个舵面的位移响应逐渐收敛;且方向舵与副翼、升降舵及襟翼相比有较大位移。

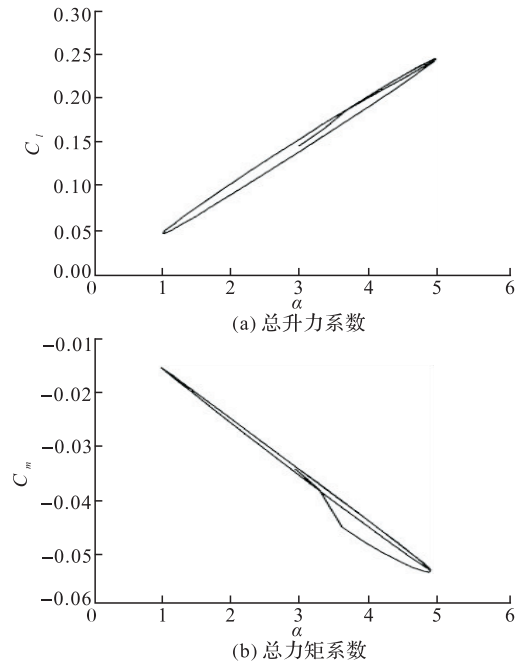


图2 非定常气动特性

Fig.2 Unsteady aerodynamic characteristics

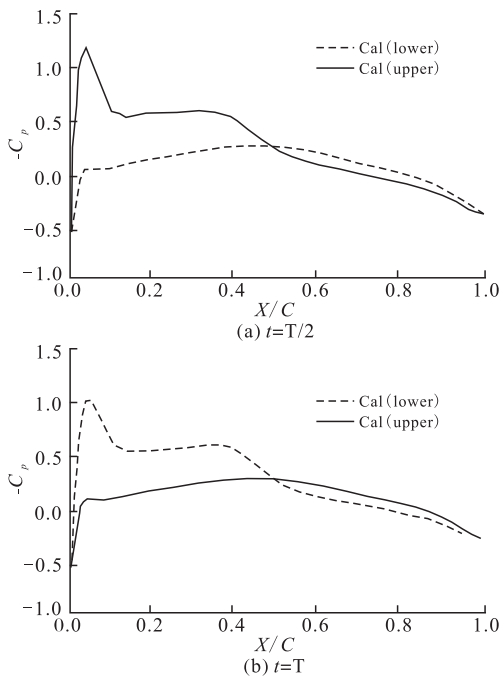


图3 65%展向剖面压力系数

Fig.3 The pressure coefficient distribution of the 65% profile surface

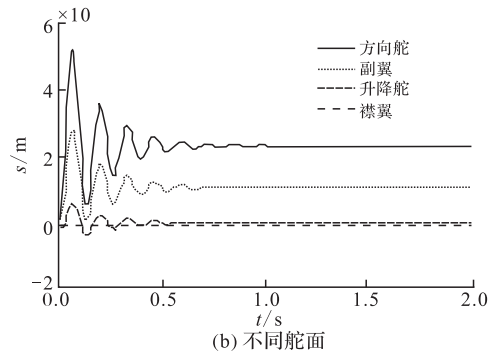
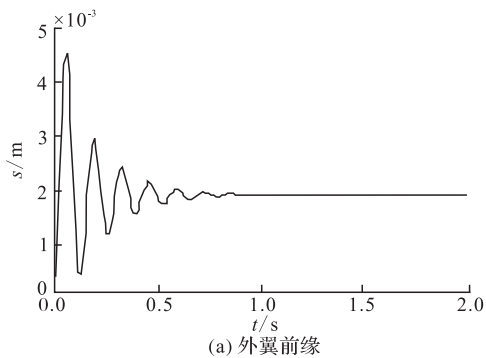


图4 不同位置位移响应

Fig.4 Displacement responses at different locations

4 方向舵嗡鸣

方向舵旋转的约束模型见图5。舵面的约束施加在飞翼无人机半模的结构模型中,对方向舵转轴的2个端面分别在柱坐标系下施加约束,其中方向舵的旋转方向定义在柱坐标系的Y方向,在嗡鸣响应分析中同时对机身根部施加固定约束。本文的飞翼无人机方向舵舵面运动方程为:

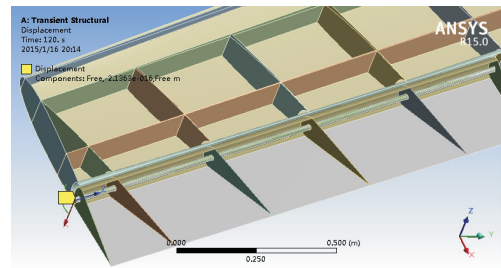


图5 方向舵旋转的约束

Fig.5 The constraints of the rudder motions

$$\beta(t) = \beta_0 + \beta_m \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中:平均舵面转角 $\beta_0 = 0^\circ$;最大舵面转角 $\beta_m = 10^\circ$ 。

图6为不同时刻方向舵偏转的结构变形云图,从图中可看出不同时刻方向舵的位置和变形区域有所不同。

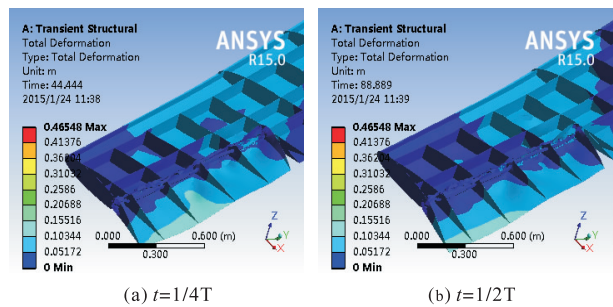


图6 不同位置响应

Fig.6 Different locations responses

图 7(a)为给定计算状态下方向舵舵面偏角随时间响应历程,从图中可看出开始时偏角响应幅值均较大,随着时间增大偏角逐渐稳定;图 7(b)为全机不同舵面振动位移响应,从图中可看出方向舵位移整体较大,襟翼位移响应与其它各个舵面相比最小。

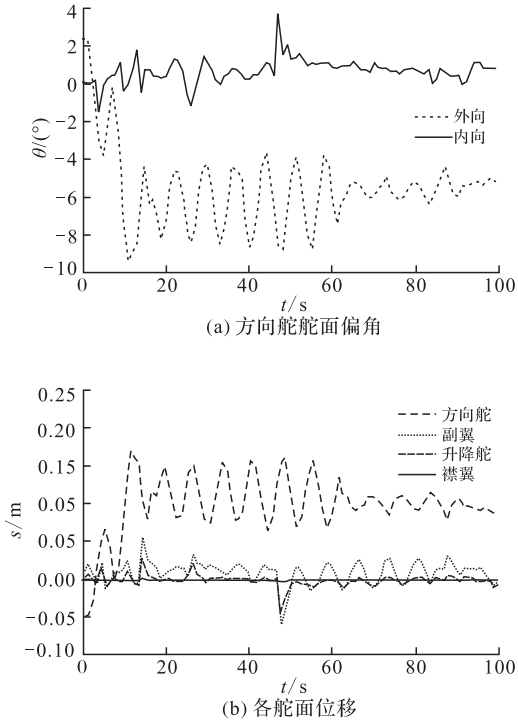


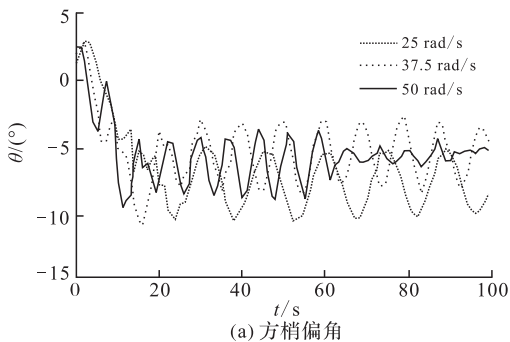
图 7 不同时刻舵面结构变形云图

Fig.7 The structural deformation at different times

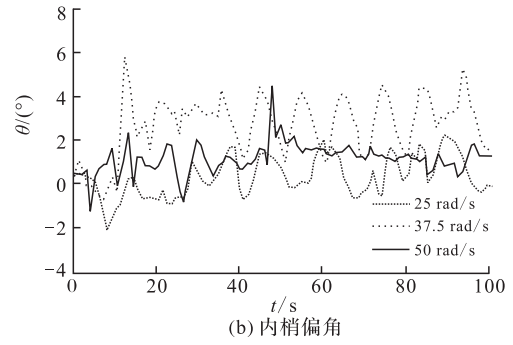
5 角频率参数分析

图 8 为旋转角频率参数对方向舵外梢和内梢点角度的影响,从图中可看出:不同方向舵旋转角频率对外梢和内梢点偏角响应较大,且旋转角频率增大,偏角响应频率也增大。

图 9 为旋转角频率对振动位移影响。从图中可看出旋转角频率对方向舵振动响应频率影响较大,且旋转角频率增大振动响应频率也增大。



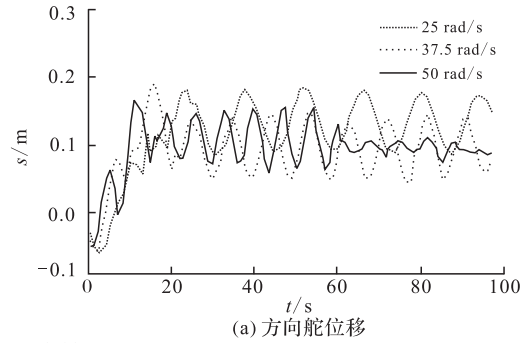
(a) 方梢偏角



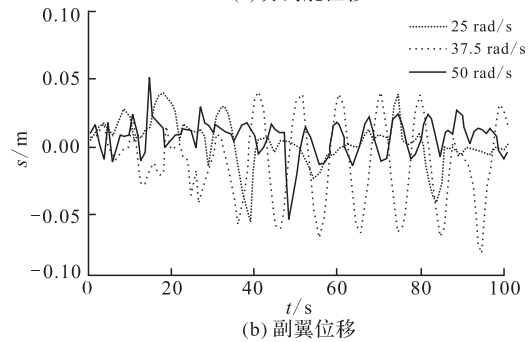
(b) 内梢偏角

图 8 角频率对偏角影响

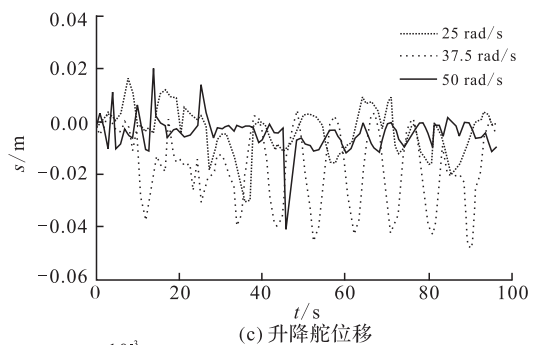
Fig.8 Effect of rotational frequency on angle responses



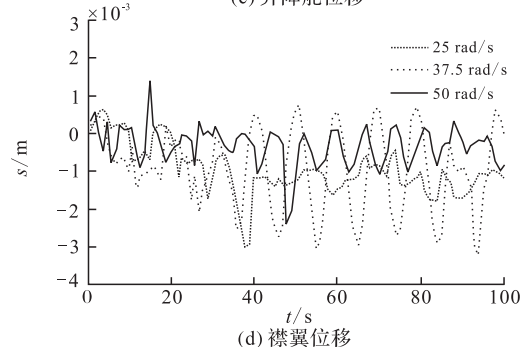
(a) 方向舵位移



(b) 副翼位移



(c) 升降舵位移



(d) 襟翼位移

图 9 频率对位移影响

Fig.9 Effect of rotational frequency on displacement

6 结论

本文通过气动结构耦合技术研究了飞翼无人机方向舵旋转引起的嗡鸣响应及全机振动响应,得到以下结论:

1) 方向舵旋转引起的嗡鸣响应问题中,方向舵外缘梢部的偏角响应比其它监测点剧烈。

2) 方向舵旋转角频率对飞翼无人机方向舵旋转引起的方向舵嗡鸣及全机振动响应频率有较大影响;且随着旋转角频率增大,方向舵嗡鸣响应及全机振动响应的频率也增大。

3) 飞翼无人机方向舵偏转引起的嗡鸣响应中,方向舵的结构变形最为严重,而机身、内翼及襟翼受到的影响较小。

参考文献(References):

- [1] XU Jun, MA Xiaoping. Transonic Rudder Buzz on Tailless Flying Wing UAV[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 32(1): 61-69.
- [2] LI Jie, HUANG Shouzhi. Unsteady Viscous Flow Simulations by a Fully Implicit Method with Deforming Grid[R]. AIAA, 2005-121.
- [3] 王军利, 周洲. 用改进非结构动网格方法模拟跨音速非定常绕流[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(3): 10-14.
WANG Junli, ZHOU Zhou. Simulation of Transonic Unsteady Flow with Improved Unstructured Dynamic Grid Method[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2009, 10(3): 10-14. (in Chinese).
- [4] 安效民, 徐敏, 陈士橹. 一种新的界面映射推进方法及其在气动弹性力学中的应用[J]. 宇航学报, 2009, 29(5): 1472-1479.
- AN Xiaomin, XU Min, CHEN Shilu. A New Interface Mapping and Marching Method for Aeroelasticity[J]. Journal of Astronautics, 2009, 29(5): 1472-1479. (in Chinese)
- [5] RAMPURAWALA A M, BADCOCK K J. Treatment of Complex Configuration for Flutter Calculations[R]. AIAA 2006-2077.
- [6] 陈志敏, 徐敏, 陈士橹. 跨声速静气动弹性结构响应分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(1): 1-4.
CHEN Zhimin, XU Min, CHEN Shilu. An Analysis of Structural Response for Transonic Static Aeroelasticity[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2005, 6(1): 1-4. (in Chinese).
- [7] 刘千刚, 代捷, 白俊强. 跨音速操纵面嗡鸣 Hopf 分叉分析及结构参数对嗡鸣特性影响的研究[J]. 航空学报, 1999, 20(6): 527-532.
LIU Qian'gang, DAI Jie, BAI Junqiang. Hopf-Bifurcation Analysis of Transonic Control Surface Buzz and Investigation of the Influence of Structural Parameters on Buzz Characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(6): 527-532. (in Chinese)
- [8] 许军, 马晓平. 飞翼无人机嗡鸣气动弹性响应分析[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(4): 588-595.
Xu Jun, Ma Xiaoping. Buzz Aeroelastic Responses Analysis for a Flying Wing UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(4): 588-595 (in Chinese).
- [9] Guowei Yang, Shigeru Obayashi. Aileron Buzz Simulation Using an Implicit Multiblock Aeroelastic Solver[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(3): 580-589.
- [10] ZHANG Weiwei, YE Zhengyin. Effect of Control Surface on Airfoil Flutter in Transonic Flow[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(7-8): 999-1007.

(编辑: 徐敏)