文章编号:1674-8190(XXXX)XX-001-08

伸缩翼无人机非对称伸缩状态颤振特性研究

杨建[1,4],蒋盼盼[2],陈立勇[2],刘小川[3],王巍[1,4]
(1.西北工业大学 航空学院,西安 710072)
(2.航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司,南昌 330024)
(3.中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室,西安 710065)
(4.强度与结构完整性全国重点实验室,西安 710072)

摘 要: 伸缩翼无人机不仅具有良好的宽速域飞行性能,还能利用机翼非对称伸缩进行飞行控制。以机翼可非对称伸缩无人机为研究对象,将其伸缩过程进行状态离散并考虑结构与气动力的非对称性建立非对称状态动力学有限元模型,研究机翼非对称伸缩状态下颤振特性的变化规律。结果表明:伸缩翼无人机非对称伸缩状态的颤振速度与颤振频率均高于基准对称状态;当伸缩非对称度增大到一定值之后,颤振形式由体自由度颤振转变为弯扭耦合颤振,使得颤振速度与颤振频率显著增大。

关键词: 伸缩翼无人机;非对称伸缩状态;气动弹性建模;模态分析;颤振特性
中图分类号: V215.3^{+}4 **文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Study on the asymmetric extension state's flutter characteristics of a telescopic wing UAV

YANG Jian[1,4], JIANG Panpan[2], CHEN Liyong[2], LIU Xiaochuan[3], WANG Wei[1,4]
(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710012, China)
(2. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Company Ltd., Nanchang 330024, China)
(3. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)
(4. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Xi'an 710072, China)

Abstract: Telescopic wing UAVs not only exhibit excellent flight performance across a wide speed range but can also utilize asymmetric wing extensions for flight control. This study focuses on a UAV with asymmetrically extendable wings. The extension process is discretized into distinct states, and a dynamic finite element model considering both structural and aerodynamic asymmetries is established to investigate the changes in flutter characteristics under asymmetric extension. The results show that both the flutter speed and flutter frequency in the asymmetricextension states are higher than those in the baseline symmetric state. As the asymmetry degree increases, the form of flutter transitions from body freedom flutter to bending-torsion coupling flutter, resulting in significant increases in both flutter speed and flutter frequency.

Key words: telescopic wing UAV; asymmetric extension states; aeroelastic modelling; modal analysis; flutter characteristics

收稿日期: 2024-05-30; **修回日期:** 2024-09-10
基金项目: 试验平台试验研究(2022ZX0561)
通信作者: 王巍(1981—),男,博士,副教授。E-mail: wwang@nwpu.edu.cn
引用格式: 杨建,蒋盼盼,陈立勇,等. 伸缩翼无人机非对称伸缩状态颤振特性研究[J]. 航空工程进展,XXXX,XX(XX):1-8.
YANG Jian, JIANG Panpan, CHEN Liyong, et al. Study on the asymmetric extension state's flutter characteristics of a telescopic wing UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

0 引 言

伸缩翼是可变体机翼的一个分支类型，这种变体形式主要通过改变机翼翼展和面积来改变飞行器的飞行性能，以适应不同的飞行任务需求[1-3]。伸缩翼的概念最早可追溯到1931年的MAK-10飞机，其发展由于受到技术等因素制约而一度停滞。近年来，随着材料和结构驱动技术的发展，伸缩翼技术又重新得到了人们的重视，对其研究大多集中在无人机上[4-8]。伸缩翼无人机具有可兼顾高低速飞行的良好飞行性能，实际飞行中还可利用机翼的非对称伸缩变形产生滚转力矩，对其进行飞行控制。郭建国等[5]利用牛顿—欧拉法建立了飞行器多刚体动力学模型，探讨了非对称伸缩变形对滚转力矩和纵向静稳定性等动力学特性的影响，结果表明非对称伸缩翼可作为一种有效的主动控制方式；Ajaj等[6]提出了一种机翼可以分别实现对称和非对称伸缩变形的伸缩翼无人机，并利用非对称变形提供滚转力矩操控无人机滚转。该伸缩翼无人机的控制程序将机翼伸缩过程离散为五个指令，每次变化10%展长，可实现单侧机翼独立伸缩，从而实现机翼的非对称伸缩状态。

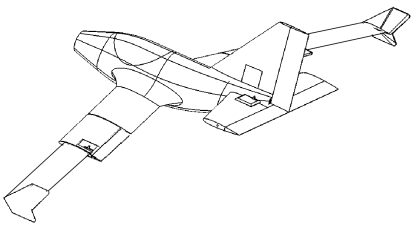
伸缩翼无人机机翼发生伸缩变形时，机翼结构的质量刚度分布及气动力均在发生变化，其气动弹性特性会随之发生变化。Huang Ren等[7]基于时变边界条件下的欧拉—伯努利梁理论，建立了伸缩翼无人机的时变结构半模模型，研究了伸缩翼对称变形时的瞬态颤振特性，并给出了不考虑变形速度下的翼展对称变化对颤振速度和频率的影响规律，结果表明，随着机翼对称伸长，无人机的颤振临界速度和颤振频率都会显著下降；Huang Chao等[8]通过准静态建模方法，建立了欧拉—伯努利梁与非定常气动力相结合的状态空间气动弹性方程，通过对计算结果的观察，发现随着翼展对称伸长，无人机的颤振形式发生了从弯扭耦合颤振到体自由度颤振[9-11]的变化。伸缩翼无人机会因飞行控制需要，使机翼处于非对称伸缩状态；此外，如果伸缩过程中出现机构故障也会导致出现非对称伸缩状态。目前对于伸缩翼无人机颤振特性的研究主要集中在对称变形状态，而非对称伸缩状态对其颤振特性的影响规律研究还有待开展。

本文以某伸缩翼无人机为研究对象，按照其伸缩控制策略考虑伸缩翼离散伸缩过程中出现的不同机翼伸缩状态，针对左右机翼在各伸缩状态下质量与刚度的分布特点，采用准静态建模方法分别建立各状态的结构动力学有限元模型，考虑气动力的非对称情况，计算得到各状态下该伸缩翼无人机的颤振特性；重点分析机翼非对称伸缩状态下该伸缩翼无人机的颤振特性变化规律，并通过模态追踪分析颤振特性发生显著变化的原因。

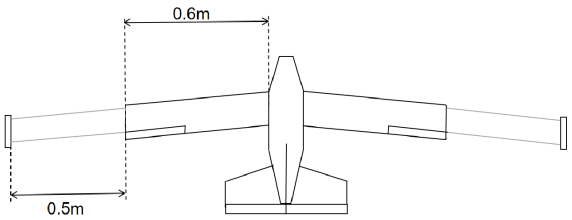
1 考虑机翼非对称伸缩状态的结构动力学建模及分析

1.1 伸缩翼无人机

本文以伸缩翼无人机（如图1所示）为研究对象。该伸缩翼无人机机翼完全伸展时翼展2.4 m，完全收缩状态下翼展1.4 m，伸缩翼具体几何数据如表1所示。



（a）无人机三维图



（b）无人机平面俯视图

图1 伸缩翼无人机（完全伸展状态）
Fig. 1 Fullydeployed telescopic wing UAV

表1 伸缩翼几何参数
Table 1 Geometric parameters of telescopic wing

状态	翼面积/m^2	翼展/m	展弦比
完全伸展	0.312	2.4	18.46
完全缩进	0.210	1.4	9.33

从图 1(b)可以看出:该伸缩翼无人机的可伸缩段长度为 0.5 m,根据功能需求设计离散伸缩控制量为每级 0.1 m,伸缩机构可对两侧机翼进行独立伸缩,从而实现机翼的非对称伸缩调控。根据伸缩控制设计,该伸缩翼无人机可实现 36 种机翼伸缩状态,其中 6 种对称伸缩状态,30 种非对称伸缩状态。

为了便于描述这些伸缩状态下左右机翼伸缩的非对称情况,本文定义伸缩非对称度 AsD 来表征不同状态下伸缩翼的非对称程度。

$$AsD = l_{long}/l_{short} \tag{1}$$

式中:l_{long} 为伸缩控制执行后左、右机翼展长中相对较长的展长值;l_{short} 为伸缩控制执行后左、右机翼展长中的相对较小值。特殊地当左右机翼对称伸缩时,定义 AsD 值为 1。

表 2　各状态伸缩非对称度

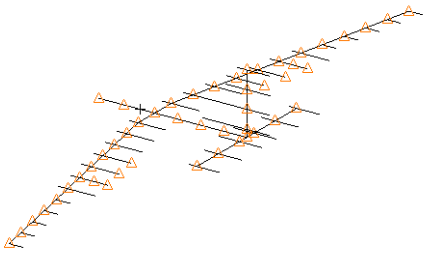
Table 2　AsD of different states

左翼展长/m	右翼展长/m					
	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
1.1	状态 1 1	/	/	/	/	/
1.0	状态 2 1.1	状态 7 1	/	/	/	/
0.9	状态 3 1.22	状态 8 1.11	状态 12 1	/	/	/
0.8	状态 4 1.38	状态 9 1.25	状态 13 1.13	状态 16 1	/	/
0.7	状态 5 1.57	状态 10 1.43	状态 14 1.29	状态 17 1.14	状态 19 1	/
0.6	状态 6 1.83	状态 11 1.67	状态 15 1.5	状态 18 1.33	状态 20 1.17	状态 21 1

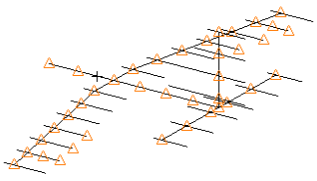
从表 2 可以看出:非对称状态沿着对角线对称分布,对角线右侧状态的机翼伸缩非对称度与气弹特性与左侧相同。因此本文后续开展颤振特性分析只需考虑 21 个机翼伸缩状态,各状态的编号以及具体参数在表 2 中列出。状态 1、7、12、16、19、21 为伸缩翼无人机对称状态,在此将前五个对称状态设置为非对称变形的基准状态,其余 15 个非对称伸缩状态均由各个基准对称状态按级依次缩进左翼得到。

1.2　考虑非对称伸缩状态的全机结构动力学建模

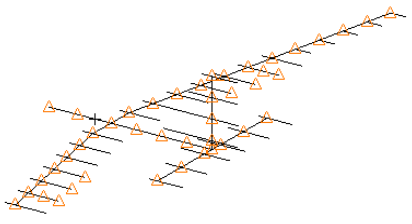
根据前文所给出的各个状态参数,本文分别建立了 21 个机翼不同伸缩状态下的全机结构动力学有限元模型。在建立结构动力学模型时,机翼采用多段梁单元建模,描述机翼展向不同位置处的刚度分布。将机翼蒙皮、伸缩机构等质量以集中质量形式,附加在梁单元结点上,使得有限元模型与不同状态下伸缩翼的质量、刚度分布对应[12]。本文所建立的伸缩翼无人机动力学有限元模型的三个示例如图 2 所示。



(a) 对称状态 1



(b) 对称状态 21



(c) 非对称状态 6

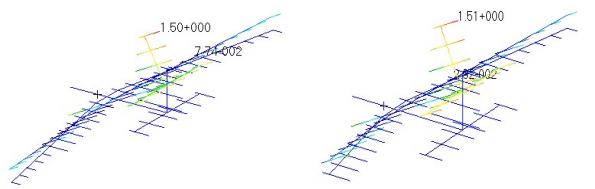
图 2　部分状态动力学有限元模型

Fig. 2　Dynamics finite element model of partial state

1.3　考虑非对称伸缩状态的全机结构模态分析

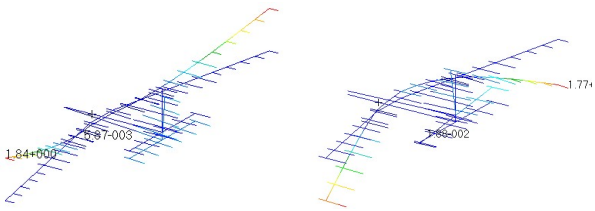
利用建好的有限元模型进行模态分析,得到

本文研究的伸缩翼无人机21个伸缩状态下全机结构的前十阶模态结果。分析模态结果发现，机翼不同伸缩状态虽然结构的质量和刚度分布发生了明显变化，但是全机结构各阶模态排列次序不变，其中包括无人机前六阶刚体模态，四阶弹性模态依次是第七阶机翼垂直对称一弯、第八阶机翼面内对称一弯、第九阶机翼垂直二弯和第十阶机翼面内二弯。与伸缩翼无人机颤振特性相关的三阶模态，在对称以及非对称状态下的振型和频率，如图3所示。



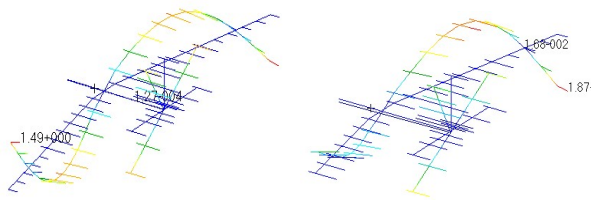
(a1) 对称状态1(0.002 Hz)　(a2) 非对称状态6(0.003 Hz)

(a) 第六阶刚体俯仰模态



(b1) 对称状态1(2.54 Hz)　(b2) 非对称状态6(3.51 Hz)

(b) 第七阶机翼垂直一弯



(c1) 对称状态1(9.09 Hz)　(c2) 非对称状态6(11.5 Hz)

(c) 第九阶机翼垂直二弯

图3　模态振型图

Fig.3　Modal shape diagram

基准对称状态1，以及由基准对称状态1出发，依次缩进左翼得到的五个非对称状态的各阶弹性模态频率值如表3所示。结合表2～表3，可以看出：随着伸缩非对称度的增大，机翼各阶弹性模态频率都有所增大。出现这一现象的原因是，随着机翼缩进其展长缩短，机翼展向弯曲刚度相比基准对称状态逐步增大，机翼模态固有频率会随之增大。

表3　部分状态各阶模态频率

Table 3　Modal frequency of each order for partial states

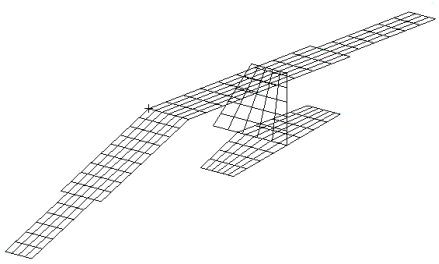
各阶模态名称	不同状态模态频率/Hz					
	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	状态6
垂直一弯	2.54	2.70	2.88	3.08	3.29	3.51
水平一弯	5.72	6.11	6.50	6.88	7.24	7.56
垂直二弯	9.09	9.69	10.30	10.80	11.20	11.50
水平二弯	11.90	12.40	13.10	14.00	15.10	16.20

2　伸缩翼无人机颤振特性计算分析

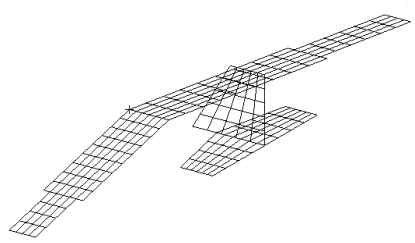
基于上节得到的伸缩翼无人机的21种机翼伸缩状态的有限元模型，使用Nastran的气弹分析模块对各个状态开展了颤振特性分析。这里利用偶极子格网法[13]计算非定常气动力，利用pk法[14]求解不同机翼伸缩状态下的颤振方程并绘制 V-g 曲线与 V-f 曲线[15]，进一步分析得到颤振临界速度与颤振频率的变化规律。

2.1　伸缩翼无人机颤振特性分析的气动网格

本文对伸缩翼无人机颤振特性的计算中，对该伸缩翼无人机全机共建立了7个区域的气动网格[16]，涵盖左侧机翼固定段、伸缩段，右侧机翼固定段、伸缩段，平尾以及垂尾，气动网格总数共240个。伸缩翼无人机左右机翼缩进后，按照伸缩段具体情况重新划分气动网格，由此考虑了因结构非对称引起的气动力非对称的影响。给出典型对称以及非对称伸缩状态下的气动网格划分情况如图4所示。



(a) 对称状态1



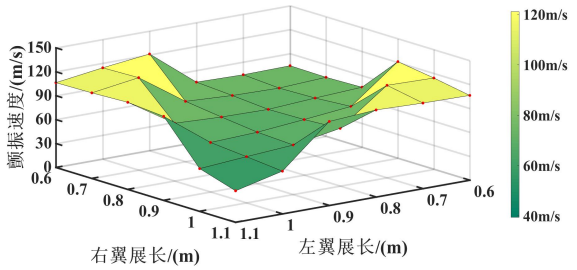
(b) 非对称状态 20

图 4　典型状态气动网格

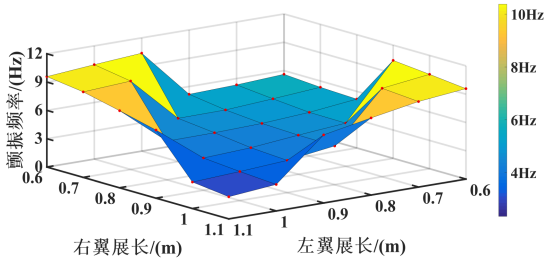
Fig. 4　Aerodynamic surface mesh in different states

2.2　考虑非对称伸缩状态的全机颤振特性计算结果

通过颤振特性分析,获得了本文所研究伸缩翼无人机的 21 种机翼伸缩状态的颤振特性结果。考虑表 2 中的伸缩翼无人机的非对称状态颤振特性对称分布,给出伸缩翼无人机颤振临界速度以及颤振频率在左右翼展变化域上的分布如图 5 所示。



(a) 颤振速度分布



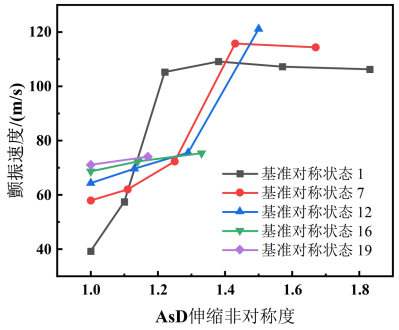
(b) 颤振频率分布

图 5　伸缩翼无人机不同状态颤振特性分布

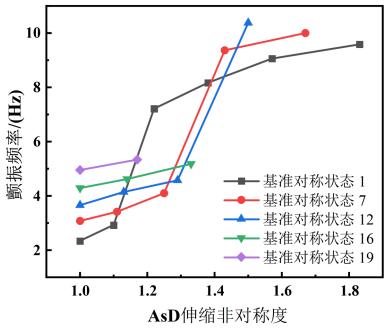
Fig. 5　Distribution of flutter characteristics for different states of the telescopic wing UAV

从整体上看伸缩翼无人机的颤振速度与颤振频率呈“山谷”式分布,伸缩翼无人机在对称状态下的颤振速度与颤振频率与非对称状态相比普遍较低,并随着机翼展长的减小而逐渐缓慢增大。在伸缩翼无人机从基准对称状态的收缩单侧机翼进行左右机翼展长非对称变形的过程中,非对称状态的颤振速度与颤振频率均高于基准对称状态,部分非对称状态的颤振速度与颤振频率发生了跳跃式增长,远高于基准对称状态。

为了进一步分析非对称伸缩状态下,无人机的颤振特性变化趋势。由不同基准对称状态出发,缩进左翼得到的非对称状态颤振特性随伸缩非对称度的变化曲线如图 6 所示。



(a) 颤振速度变化趋势



(b) 颤振频率变化趋势

图 6　不同基准对称状态下颤振特性随伸缩非对称度变化趋势

Fig. 6　Trend of flutter characteristics with AsD in different basic symmetric states

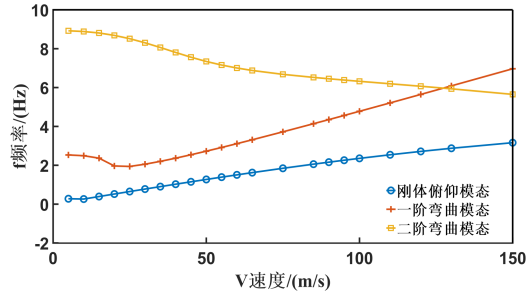
伸缩翼无人机由基准对称状态进行非对称缩进的过程中,随着伸缩非对称度增大,伸缩翼无人机的颤振速度与颤振频率先缓慢增大,当伸缩非对称度达到临界值时发生突增;随着伸缩非对称度继续增大,无人机的颤振速度逐渐稳定,而颤振频率会持续增大。同时可以发现,不同基准对称

状态下伸缩翼无人机颤振特性发生突变的非对称度临界值随着翼展的缩短而增大。当伸缩翼无人机基准对称状态的翼展缩进到1.8 m及以下，即达到基准对称状态16、19时，通过缩进单侧机翼实现的非对称状态其颤振特性不再发生突变，随着伸缩非对称度增大颤振速度变化幅度很小。

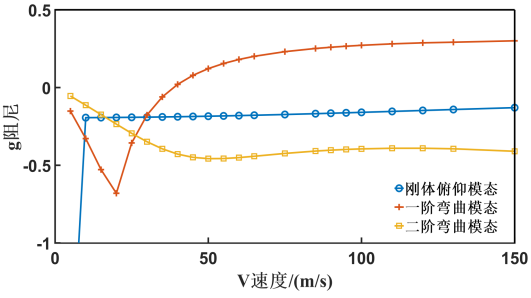
2.3 考虑非对称伸缩状态的颤振特性分析

本文所研究的伸缩翼无人机的颤振特性计算结果表明，伸缩翼非对称伸缩状态对于伸缩翼无人机的颤振特性具有显著的影响。本节通过追踪图6中由基准对称状态1得到的非对称状态下，无人机结构的固有模态参与情况，分析颤振特性发生变化的原因。

首先分析伸缩翼无人机在基准对称状态1的颤振特性，给出状态1的 V-g 与 V-f 曲线如图7所示。由 V-f 曲线可知，对于机翼完全展开的对称状态1，颤振主要参与模态为刚体俯仰模态与机翼的垂直一弯模态。伸缩翼无人机对称状态1的颤振形式为俯仰刚体模态参与的体自由度颤振，计算得到该状态颤振临界速度为39.3 m/s，颤振频率为2.34 Hz。



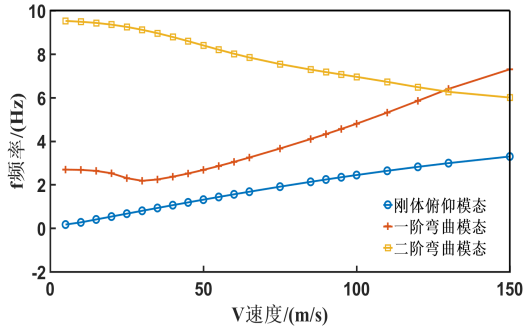
(a) V-f图



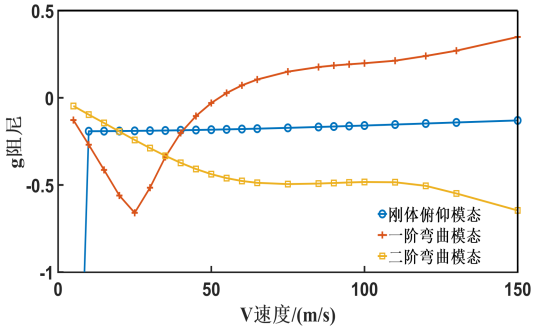
(b) V-g图

图7 对称状态1颤振特性

Fig. 7 Symmetric state 1 flutter characteristics



(a) V-f图



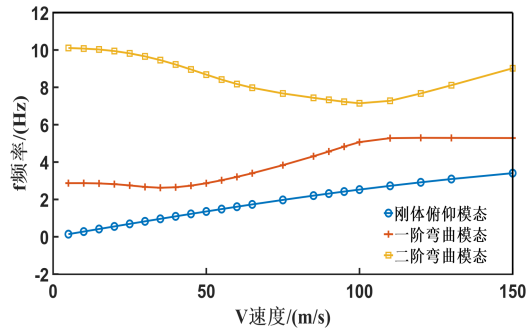
(b) V-g图

图8 非对称状态2颤振特性

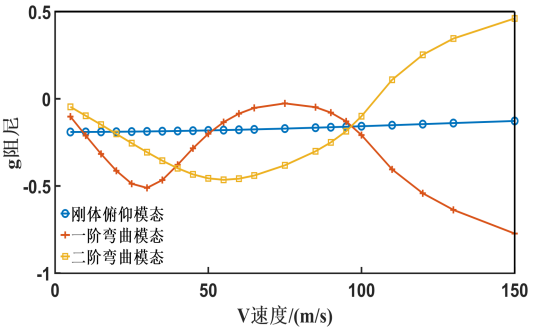
Fig. 8 Asymmetric state 2 flutter characteristics

非对称伸缩状态2其伸缩非对称度AsD＝1.1，从图8可以看出：伸缩翼无人机状态2的颤振参与模态为刚体俯仰模态与机翼一弯模态，该状态下的颤振形式仍为体自由度颤振。与对称状态1相比，状态2的颤振速度从39.3增大到57.5 m/s，颤振频率也从2.34增大到2.92 Hz。

对于非对称状态3其伸缩非对称度AsD＝1.22，从图9可以看出：在非对称伸缩状态3下，机翼一弯模态与二弯模态频率逐渐靠近，刚体模态不再参与颤振，无人机的颤振形式由体自由度颤振转变为了弯扭耦合颤振。由于颤振形式的改变，使得伸缩翼无人机的颤振特性发生突变，颤振速度与颤振频率发生突增。颤振速度由状态2的57.5 m/s增大到105.28 m/s，颤振频率也由上一状态的2.92 Hz增大到7.21 Hz。



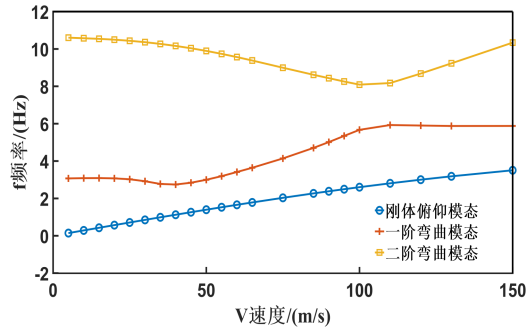
(a) V-f图



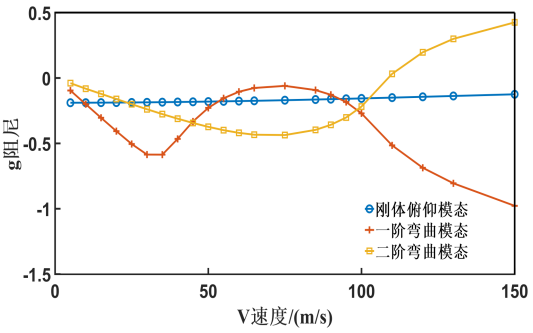
(b) V-g图

图 9　非对称状态 3 颤振特性

Fig. 9　Asymmetric state 3 flutter characteristics



(a) V-f图



(b) V-g图

图 10　非对称状态 4 颤振特性

Fig. 10　Asymmetric state 4 flutter characteristics

对于非对称状态 4 其伸缩非对称度 AsD=1.33,可以发现随着伸缩非对称度进一步增大,颤振参与模态没有发生变化,颤振形式保持仍为弯扭耦合颤振,伸缩翼无人机的颤振频率小幅增大颤振速度趋于稳定。对于伸缩非对称度更大的非对称状态 5、状态 6 进行分析与状态 4 结果一致。

对于其余非对称伸缩状态的颤振计算结果分析发现,其颤振特性发生突变的原因均是因为非对称伸缩改变了无人机的颤振形式,使得无人机由颤振速度较低的体自由度颤振变为了弯扭耦合颤振。

3　结　论

1) 伸缩翼无人机对称伸缩过程中,随着翼展减小颤振速度与颤振频率会随之增大;伸缩翼由基准对称状态缩进单侧机翼而产生的非对称缩状态也会引起无人机颤振特性的变化,颤振速度与颤振频率随着伸缩非对称度的增大而逐渐增大,这种变化规律对伸缩翼无人机利用左右机翼非对称伸缩变形进行机动控制是有利的。

2) 对于本文研究的伸缩翼无人机由基准对称状态进行非对称伸缩,随着伸缩非对称度增大时,无人机的各阶弹性模态频率逐渐增大;当伸缩非对称度增大到临界值后,机翼一弯模态与刚体俯仰模态分离,该伸缩翼无人机的颤振形式由体自由度颤振变化为弯曲耦合颤振,进而颤振速度与颤振频率会发生突增。

对本文研究的伸缩翼无人机而言,机翼非对称缩进达到非对称度临界值后会使得全机颤振速度大幅提高,未来有必要对该临界值的影响因素和确定方法开展研究。此外,未来针对伸缩翼无人机机翼连续伸缩情况下的非对称伸缩态颤振特性的计算分析,可考虑引入机器学习的方法对其颤振特性进行预测,降低颤振特性分析计算量。还可以考虑建立伸缩翼全机时变气动弹性耦合模型,研究非对称伸缩速度等变量,对于全机颤振特性的影响。

参 考 文 献

[1] BARBARINO S, BILGEN O, AJAJ R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 823-877.

[2] LI D C, ZHAO S W, DA RONCH A, et al. A review of

modelling and analysis of morphing wings[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 100: 46-62.

[3] AJAJ R M, PARANCHEERIVILAKKATHIL M S, AMOOZGAR M, et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 120: 100682.

[4] 陈树生, 贾苜梁, 刘衍旭, 等. 变体飞行器变形方式及气动布局设计关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 7-53, 2.
CHEN Shusheng, JIA Muliang, LIU Yanxu, et al. Deformation modes and key technologies of aerodynamic layout design for morphing aircraft: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(6): 7-53, 2. (in Chinese)

[5] 郭建国, 陈惠娟, 周军, 等. 非对称伸缩翼飞行器动力学建模及特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1951-1957.
GUO Jianguo, CHEN Huijuan, ZHOU Jun, et al. Dynamics Modeling and characteristic analysis for vehicle with asymmetric span morphing wing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(8): 1951-1957. (in Chinese)

[6] AJAJ R M, JANKEE G K. The Transformer aircraft: a multimission unmanned aerial vehicle capable of symmetric and asymmetric span morphing[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 512-522.

[7] HUANG R, QIU Z P. Transient aeroelastic responses and flutter analysis of a variable-span wing during the morphing process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(6): 1430-1438.

[8] HUANG C, YANG C, WU Z G, et al. Variations of flutter mechanism of a span-morphing wing involving rigid-body motions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(3): 490-497.

[9] LOVE M, ZINK P, WIESELMANN P, et al. Body freedom flutter of high aspect ratio flying wings[C]// 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Austin, Texas, USA: AIAA, 2005: 1947.

[10] 石鹏涛. 翼身融合飞翼的体自由度颤振飞行试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
SHI Pengtao. Body freedom flutter flight test study of BWB flying wing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020. (in Chinese)

[11] 杨特, 杨智春, 梁舒雅, 等. 平稳随机载荷的信号特征提取与深度神经网络识别[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 225952.
YANG Te, YANG Zhichun, LIANG Shuya, et al. Feature extraction and identification of stationary random dynamic load using deep neural network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 225952. (in Chinese)

[12] 张友坡. 有限元技术在飞机结构动力学仿真中的应用[J]. 装备制造技术, 2014(5): 109-111.
ZHANG Youpo. Application of finite element method in the aircraft structural dynamics simulation[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(5): 109-111. (in Chinese)

[13] 黄礼耀. 非定常气动力计算中的偶极子格网法[J]. 洪都科技, 1996(3): 27-32.
HUANG Liyao. Doubiet lattice method in unsteady aerodynamic calculation[J]. Hongdu Science and Technology, 1996(3): 27-32. (in Chinese)

[14] 谷迎松, 杨智春, 赵令诚. 飞行器气动弹性力学教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2021: 88-94.
GU Yingsong, YANG Zhichun, ZHAO Lingcheng. Aircraft aeroelastic mechanics tutorial[M]. Xi′an: Northwestern Polytechnical University Press, 2021: 88-94. (in Chinese)

[15] 毛一青, 杨飞, 谷迎松. 15米翼展太阳能飞机机翼颤振分析和刚度设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 536-541.
MAO Yiqing, YANG Fei, GU Yingsong. Research on flutter characteristics and stiffness design for 15 meters span wing of a solar-powered aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 536-541. (in Chinese)

[16] 冒森, 张斌, 肖良华, 等. 太阳能无人机机翼颤振动力学建模与分析[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 183-189.
MAO Sen, ZHANG Bin, XIAO Lianghua, et al. Dynamic modeling and analysis of solar UAV wing flutter[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(9): 183-189. (in Chinese)

(编辑:马文静)