

基于 ANSYS 的双闭室复合材料薄壁梁的振动模态分析

孙丙磊,任勇生,王印军,宋玉璧

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:基于 ANSYS 软件对双闭室复合材料箱型薄壁梁进行模态分析。首先,建立双闭式箱型复合材料薄壁梁的模型,然后,针对两种铺层方式以及不同的纤维铺层角,分别对薄壁梁进行模态分析,揭示复合材料的铺层方式以及铺层角度对双闭室箱型薄壁梁的固有频率、模态振型的影响。

关键词:复合材料薄壁梁;模态分析;铺层方式;固有频率

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0085-06

Analysis of Vibration Modality of Double-cell Thin-walled Beam with Composite Materials Based on ANSYS

SUN Binglei, REN Yongsheng, WANG Yinjun, SONG Yubi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The modal analysis of a double-cell thin-walled box beam with composite materials was carried out based on the ANSYS software. First, a model of double-cell thin-walled box beam was created, and then, the modal analysis of thin-walled beam according to two different ply forms and different fiber layer angles was presented, revealing the influence of ply form and ply angle of composite materials on the natural frequency and the modal shape of double-cell thin-walled box beam.

Key words: thin-walled beam with composite materials; modal analysis; ply form; natural frequency

复合材料薄壁梁是现代工程结构中广泛应用的一类重要结构。这是由于复合材料薄壁梁的弯曲、扭转强度高,抗疲劳性能好。采用复合材料制成的薄壁梁重量轻、柔韧性好,不仅在飞机固定机翼和直升机旋翼中被使用^[1],而且在风力机叶片的结构设计中也得应用^[2]。

目前,复合材料薄壁梁的结构动力学分析与建模方面的研究已经取得了一些成果,但主要是针对典型的箱型单闭室截面梁的研究^[3-6]。这些研究大多基于理论解析方法建立薄壁梁的静力学与动力学模型,考虑了复合材料薄壁梁的面外翘曲、剪切变形等非经典效应。然而,大型风力机叶片具有双闭室复合材料薄壁箱型梁的特征,与单闭室箱型结构相比,双闭室箱型梁属于扭转几何不确定问题,特别是由于材料的各向异性会导致在弯扭之间存在弹性耦合,使得动力学问题的求解变得更为复杂^[7]。

本研究基于 ANSYS 软件对双闭室复合材料箱型薄壁梁进行模态分析,由此获得结构的振动特性——固有频率和振型,通过有限元模态分析揭示复合材料铺层角以及铺层方式对双闭室薄壁梁固有频率的影响。

1 双闭室复合材料箱型薄壁梁的固有频率方程

根据 Hamilton 原理,用 Galerkin 法对方程做近似处理,薄壁梁系统的特征值方程^[8-9]为

收稿日期:2011-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(10872118);山东省自然科学基金项目(Y2006F37)。

作者简介:孙丙磊(1985—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事薄壁梁振动方面的研究。E-mail:jisheshl@sohu.com。

任勇生(1956—),男,山西太原人,教授,博士,主要从事机械系统动力学方面的研究。E-mail:renys@sdust.edu.cn。

$$A\dot{y} = \lambda y \quad (1)$$

其中: $y = [x \quad \dot{x}]^T$, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & 0 \end{bmatrix}$, M —薄壁梁的质量矩阵, K —总体刚度矩阵, x —一节点位移, I —单位矩阵。求矩阵 A 的特征值 λ , 其虚部为薄壁梁的固有频率。

2 双闭室复合材料箱型薄壁梁的有限元建模

考虑一端固定一端自由的双闭室复合材料等截面箱型薄壁梁, 其外形结构如图 1 所示。其中, L —薄壁梁的长度, a —薄壁梁的宽度, b —薄壁梁的高度。

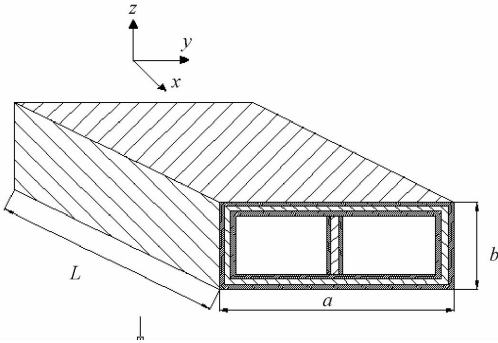


图 1 双闭室箱型薄壁梁的结构模型图

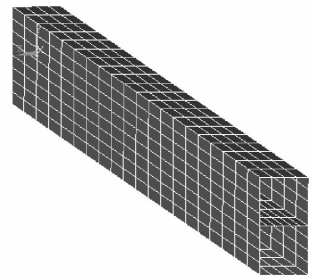


图 2 薄壁梁的有限元模型图

Fig. 1 The structural model of double-cell thin-walled box beam

Fig. 2 Finite element model of thin-walled beam

1) 创建双闭室薄壁梁的模型。选取单元类型、设置材料的属性、实常数, 对薄壁梁进行网格划分得到有限元模型, 本研究采用 Shell 壳单元进行分析, 划分网格后生成 600 个单元, 共有 1 680 个节点。双闭室箱型薄壁梁的有限元离散模型如图 2 所示。

2) 定义分析类型及分析选项, 指定 6 阶载荷步选项, 然后对薄壁梁一端实施全约束, 另一端自由, 最后执行求解命令进行求解。

3) 探讨模态分析、位移以及应力结果等, 针对双闭室薄壁梁的固有频率、振型等进行分析。

3 ANSYS 有限元结果分析

复合材料薄壁梁的材料类型选用石墨/环氧树脂, 其材料常数如表 1 所示。材料密度用 $DENS$ 表示, 各个方向的弹性模量用 E_x 、 E_y 、 E_z 表示, 各个方向的剪切模量用 G_{xy} 、 G_{xz} 、 G_{yz} 表示, 各个方向的泊松比用 PR_{xy} 、 PR_{xz} 、 PR_{yz} 表示。

表 1 材料性能参数表

Tab. 1 The performance parameters of materials

项目	材料密度/(kg/m ³)	薄壁梁尺寸/mm			弹性模量/GPa			剪切模量/GPa			泊松比		
	$DENS$	L	a	b	E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}	PR_{xy}	PR_{xz}	PR_{yz}
取值	1 672	1 524	50	25	142.0	9.8	9.8	6.00	6.00	4.83	0.42	0.42	0.50

复合材料层合板两种常见的刚度配置方式, 一种是周向均匀刚度配置 (circumferentially uniform stiffness, CUS), 另一种是周向反对称刚度配置 (circumferentially asymmetric stiffness, CAS)。两种铺层方式分别如图 3 和图 4 所示。

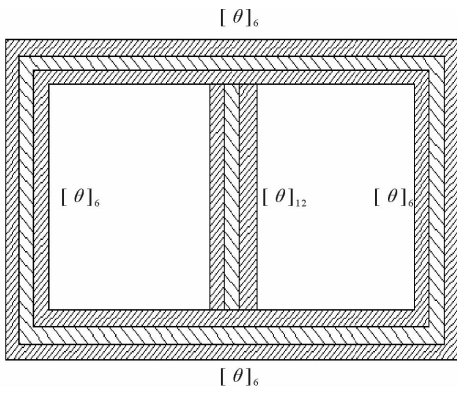


图 3 CUS 铺层方式示意图

Fig. 3 The circumferentially uniform stiffness ply form

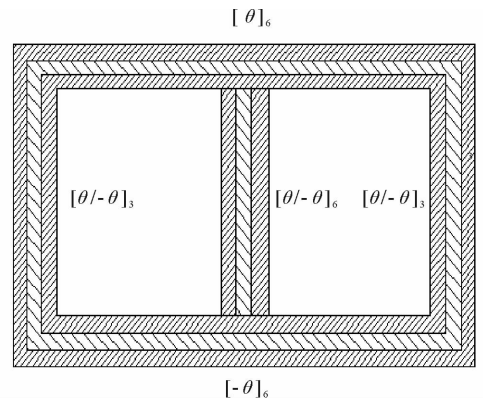


图 4 CAS 铺层方式示意图

Fig. 4 The circumferentially asymmetric stiffness ply form

3.1 双闭室复合材料薄壁梁 CUS 铺层方式

图 3 中,薄壁梁上下左右臂都铺设 6 层,中间臂铺设 12 层,铺层厚度为 0.127 mm。

1) 铺层角度为 45°时,双闭室复合材料薄壁梁前 6 阶模态振型如图 5—图 10 所示。

从模态振型图可以看出:CUS 铺层方式下,双闭室箱型薄壁梁的第一阶振型以挥舞振动为主,第二阶振型以摆振为主,第六阶振型以弯扭耦合振动为主。

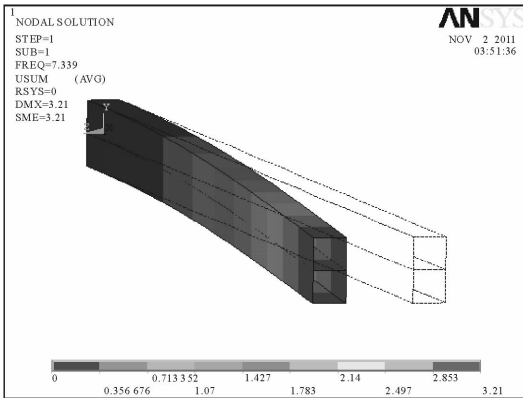


图 5 一阶模态振型图

Fig. 5 The first order modal shape

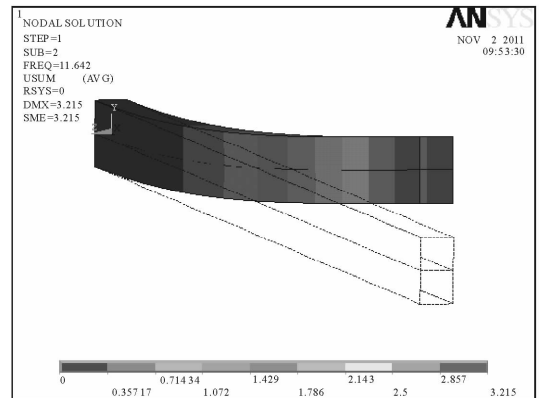


图 6 二阶模态振型图

Fig. 6 The second order modal shape

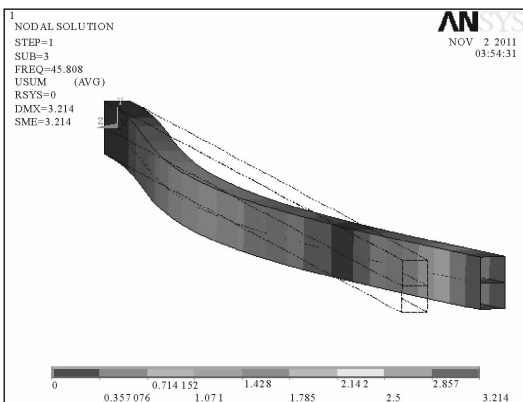


图 7 三阶模态振型图

Fig. 7 The third order modal shape

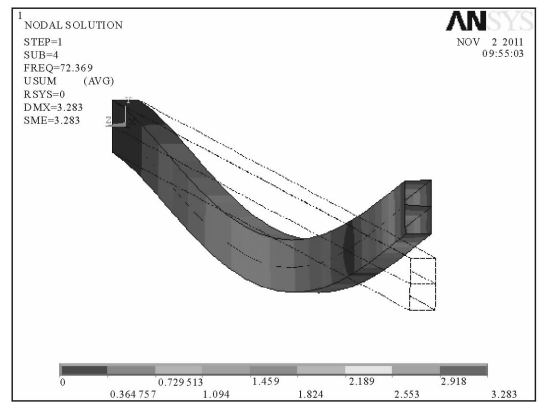


图 8 四阶模态振型图

Fig. 8 The fourth order modal shape

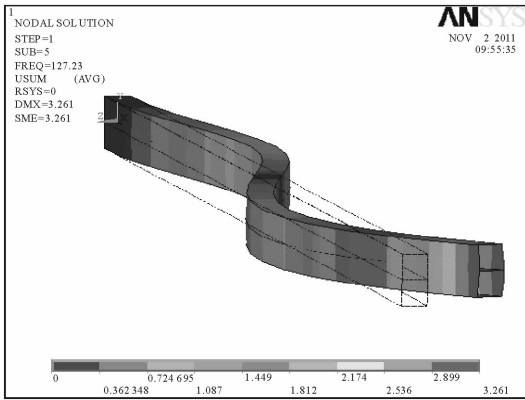


图 9 五阶模态振型图

Fig. 9 The fifth order modal shape

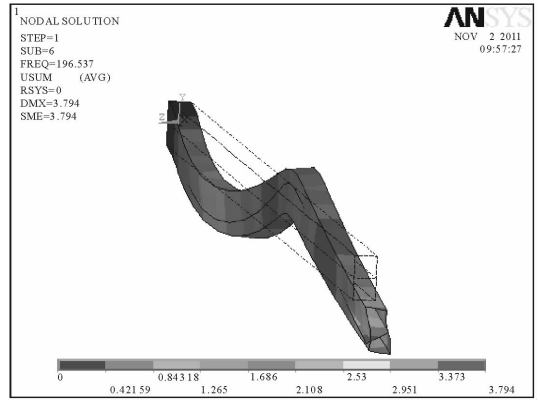


图 10 六阶模态振型图

Fig. 10 The sixth order modal shape

2) 当纤维铺层角度分别取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时,对薄壁梁分别进行模态分析,得到的模态频率信息如表 2 所示。

表 2 CUS 不同铺层角度的前 6 阶模态频率表

Tab. 2 The first six order modal frequencies of the CUS different ply angles

铺层角/ $^\circ$	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz	四阶频率/Hz	五阶频率/Hz	六阶频率/Hz
0	22.41	35.30	131.13	187.04	203.10	274.00
30	9.48	15.13	59.06	93.29	162.92	238.85
45	7.34	11.64	45.81	72.37	127.23	196.54
60	6.42	10.15	40.06	63.19	111.29	174.03
90	5.96	9.41	37.14	58.54	103.06	161.74

通过表 2 可以得出:随着铺层角度的增大,双闭室复合材料薄壁梁的模态频率逐渐减小;同一种铺层角度下,薄壁梁的模态频率随着阶数逐渐增大。

3.2 双闭室复合材料薄壁梁 CAS 铺层方式

如图 4 所示,薄壁梁上下左右臂都铺设 6 层,中间臂铺设 12 层,铺层厚度为 0.127 mm。

1) 铺层角度为 45° 时,双闭室复合材料薄壁梁前 6 阶模态振型如图 11—图 16 所示。

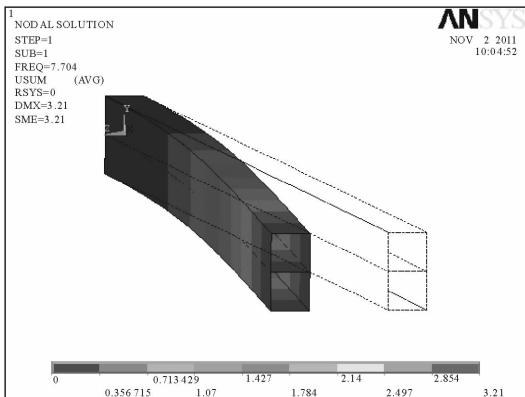


图 11 一阶模态振型图

Fig. 11 The first order modal shape

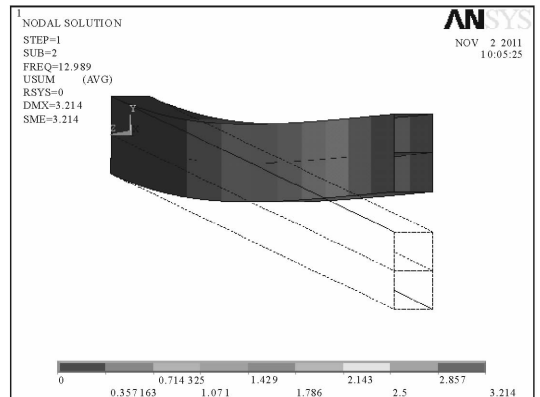


图 12 二阶模态振型图

Fig. 12 The second order modal shape

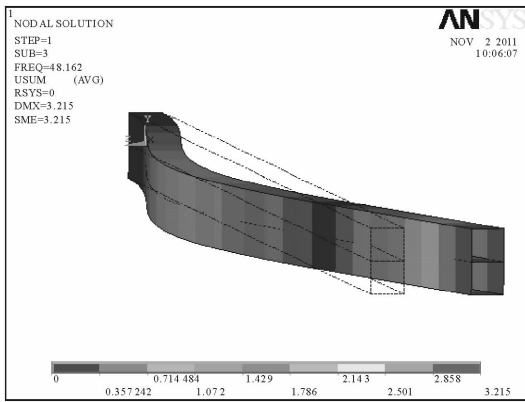


图 13 三阶模态振型图

Fig. 13 The third order modal shape

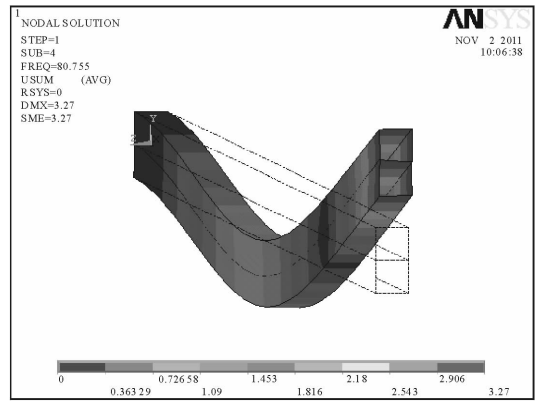


图 14 四阶模态振型图

Fig. 14 The fourth order modal shape

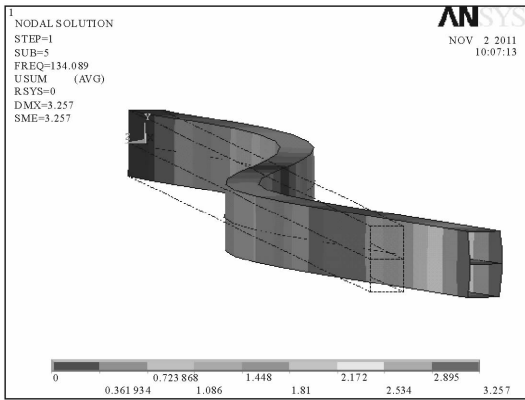


图 15 五阶模态振型图

Fig. 15 The fifth order modal shape

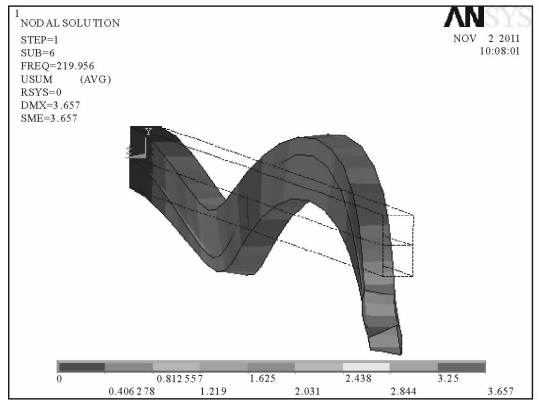


图 16 六阶模态振型图

Fig. 16 The sixth order modal shape

通过模态振型图可以看出,CAS 铺层方式下,双闭室箱型薄壁梁的第一阶振型以挥舞振动为主,第二阶振型以摆振为主,第六阶振型以弯扭耦合振动为主。

2) 当纤维铺层角度分别是 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时的模态频率信息如表 3 所示。

表 3 CAS 不同铺层角度的前六阶模态频率表

Tab. 3 The first six order modal frequencies of the CAS different ply angles

铺层角/ $^\circ$	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz	四阶频率/Hz	五阶频率/Hz	六阶频率/Hz
0	22.41	35.30	131.13	187.04	203.10	274.00
30	10.70	19.45	66.79	119.52	184.91	291.66
45	7.70	12.99	48.16	80.76	134.09	219.96
60	6.49	10.42	40.57	64.85	113.03	174.03
90	5.96	9.41	37.14	58.54	103.06	161.74

通过表 3 可以看出:同一种铺层角度下,薄壁梁的模态频率随着阶数逐渐增大;随着铺层角度的增大,双闭室复合材料薄壁梁的模态频率逐渐减小。

4 结论

采用 ANSYS 软件对双闭室复合材料箱型薄壁梁进行振动模态分析,得到以下结论。

1) 通过模态振型图可以看出:双闭室箱型薄壁梁的第一阶振型以挥舞振动为主,第二阶振型以摆振为主,第六阶振型以弯扭耦合振动为主,其他以高阶挥舞及摆振为主。

2) 根据表 1 和表 2 的数据得出:在复合材料相同铺层方式下,铺层角度不同,则得到的薄壁梁模态频率不同;在复合材料不同铺层方式下,铺层角度为 0° 和 90° 时,双闭室箱型薄壁梁得到的模态频率相同,铺层角度在 0° 和 90° 之间时,CUS 和 CAS 铺层方式下,得到薄壁梁的模态频率有较大差别。因而,复合材料铺层方式和铺层角度对双闭室复合材料薄壁梁的模态频率和模态振型有较大的影响。

参考文献:

- [1]FRIEDMANN P P. Rotary-wing aeroelasticity; current status and future trends[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2004, 42(10): 1953-1972.
- [2]BARLAS T K, VAN KUIK G A M. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46: 1-7.
- [3]DANCILA D S, ARMANIOS E A. The influence of coupling on the free vibration of anisotropic thin-walled closed-section beams[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(23): 3105-3119.
- [4]SONG O, LIBRESCU L. Structural modeling and free vibration analysis of rotating composite thin-walled beams[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1997, 42(4): 358-369.
- [5]JOHNSON E R, VASILEV V V, VASILEV D V. Anisotropic thin-walled beams with closed cross-section contours[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2001, 39(12): 2389-2393.
- [6]任勇生, 王晓辉. SMA 纤维混杂复合材料箱型薄壁悬臂梁的固有频率[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 206-210.
REN Yongsheng, WANG Xiaohui. SMA fiber hybrid composite thin-walled box the natural frequency of the cantilever beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 206-210.
- [7]JUNG S N, PARK IL J, SHIN E S. Theory of thin-walled composite beams with single and double-cell sections[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38: 182-192.
- [8]REN Y S, YANG S L, LIU T R, et al. Coupled deflection analysis of SMA fiber hybrid composite active blade[J]. Advanced Materials Research, 2009, 79-82: 1455-1458.
- [9]CESNIK C E S, SHIN S J. On the modeling of integrally actuated helicopter blades[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 1765-1789.