

考虑螺栓连接的吊挂式薄壁柱壳固有特性分析

马辉^{1,2}, 付强¹, 李坤¹, 樊富友³
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 中国兵器集团公司 长沙机电产品研究开发中心, 湖南 长沙 410100)

摘 要: 以含螺栓连接的吊挂式薄壁柱壳为研究对象,采用商用有限元分析软件 ANSYS 建立了系统的全实体/梁-壳混合有限元模型. 基于所建立的模型,分析讨论了自由/约束边界,法兰/吊挂处预紧力对系统固有特性的影响,并通过试验进行了对比验证. 研究表明:本文所建立的有限元模型能较好地模拟螺栓连接处界面接触压力及其分布情况,且在保证一定精度的前提下,梁-壳混合模型较全实体模型的计算效率高;吊挂约束的存在对系统的固有频率和振型影响较大;法兰处螺栓预紧力对系统第 5~8 阶固有频率影响较大,而吊挂处螺栓预紧力对系统前 3 阶固有频率影响较大.

关 键 词: 螺栓连接;吊挂;薄壁柱壳;固有特性;预紧力

中图分类号: V 214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)05-0686-07

Natural Characteristics Analysis of Suspended Thin-Walled Cylindrical Shells with Bolted Connections

MA Hui^{1,2}, FU Qiang¹, LI Kun¹, FAN Fu-you³
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Changsha Electromechanical Product Research and Development Center, China South Industries Group Corporation, Changsha 410100, China. Corresponding author: MA Hui, E-mail: mahui_2007@163.com)

Abstract: Toward the suspended thin-walled cylindrical shell with bolted connections, both beam-shell hybrid and full-solid finite element models were established by using ANSYS software. With the established models, the influence from boundary conditions and bolt preloads at the flange-/hoisting- structure to the system dynamic characteristics was analyzed, and corresponding numerical results were compared with experimental results. The results indicated that the finite element model established can accurately simulate the contact pressure and its distribution at the bolted interface. On the premise of guaranteeing computational accuracy, the beam-shell hybrid model was more efficient than the full-solid model. The bolt preloads at the flange had a significant effect on the fifth to eighth natural frequencies of the system, while that at the hoisting structure had a great effect on the first three natural frequencies of the system.

Key words: bolted connection; suspension; thin-walled cylindrical shell; natural characteristic; preload

螺栓连接薄壁柱壳结构应用较为广泛,如制导炸弹、导弹弹体均属于柱壳结构,并且各舱段之间多采用螺栓连接^[1]. 螺栓连接结构导致整个系统具有不连续性,进而影响到系统的安全性、可靠性. 此外,弹体在飞行过程中还可能因结构参数设计的不合理,在气流扰动下诱发共振,进而对弹体造成毁灭性破坏^[2]. 因此,有必要对螺栓连接的薄壁柱壳结构进行动力学特性分析.

Liu 等^[3]基于界面接触理论,建立了螺栓连接薄壁筒结构的三维有限元模型. Tanlak 等^[4]基于梁-壳单元建立了简化的螺栓连接模型. Boeswald 等^[5]建立了螺栓连接薄壁壳结构的非线性有限元模型. 文献[6-8]提出了无螺栓建模、混合建模及实体建模等多种建模方法,其中,基于接触的预应力法可考虑预应力对螺栓连接接触非线性的影响. Li 等^[9]研究了螺栓松动边界条件下对薄圆柱壳非线性模态特性的影响.

以上研究表明,现有关于螺栓薄壁柱壳结构的参数化建模,多采用周期对称的螺栓薄壁柱壳模型进行相关研究,较少考虑吊挂结构处螺栓连接的影响,而制导炸弹、导弹等多采用吊挂结构对其进行约束. 因此,有必要对螺栓连接-吊挂式柱壳结构进行振动特性的研究. 本文拟通过试验和仿真相结合的方式建立一种含螺栓连接的吊挂式薄壁柱壳结构,并分析自由/约束边界条件和法兰/吊挂处预紧力对结构约束边界条件下固有频率的影响.

1 数学模型及其验证

1.1 预应力模态

在螺栓连接中,接触压力分布的不均、接触面积的变化、接触面间摩擦力的存在等都会导致界面接触的非线性^[10]. 接触问题实际上是通过求解满足系列接触约束边界条件下能量最小值的位移最优解,并通过位移最优解导出其他解^[11]. 本部分仅涉及求解螺栓预紧力作用下系统的固有特性. 预应力模态法求解系统固有特性分两个环节:静力学求解和模态求解.

系统的能量泛函表达式:

$$\begin{aligned} \Pi(\boldsymbol{u}) = & \int_{t_1}^{t_2} [\Pi_1 + \Pi_2 + \\ & \int_{\Gamma_c} \left(\frac{1}{2} \alpha (g_N)^2 + \lambda_N g_N \right) ds] dt. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\Pi(\boldsymbol{u})$ 为系统总能量; Π_1 和 Π_2 为系统动能和势能; Γ_c 为接触边界; α 为罚刚度; λ_N 为拉格朗日乘子; g_N 为接触间隙.

含接触问题的静力学方程:

$$\boldsymbol{M} \ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}_e \boldsymbol{u} - \boldsymbol{B}_c \lambda_N(\alpha, \boldsymbol{u}) = \boldsymbol{0}. \quad (2)$$

式中: \boldsymbol{M} 为系统质量矩阵; \boldsymbol{K}_e 为系统结构刚度矩阵; \boldsymbol{u} 和 $\ddot{\boldsymbol{u}}$ 为系统位移、加速度; \boldsymbol{B}_c 为接触约束矩阵.

考虑接触的静力学方程:

$$\boldsymbol{K} \boldsymbol{U}_0 - \boldsymbol{B}_c \lambda_N(\alpha, \boldsymbol{u}) = \boldsymbol{R}. \quad (3)$$

式中 \boldsymbol{R} 为预紧力.

根据静力学方程,求出初应力矩阵 $\boldsymbol{K}_\sigma(\boldsymbol{u}_0)$,根据 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{K}_e + \boldsymbol{K}_\sigma(\boldsymbol{u}_0)$,结合系统质量矩阵 \boldsymbol{M} ,QZ模态求解算法,得出系统的固有频率和相应振型.

1.2 模型建立及对比

本文根据制导炸弹、导弹弹体结构(图1),相关几何参数设置见图2. 以简化的螺栓连接-吊挂式薄壁柱壳结构为研究对象,基于ANSYS软件建立了其有限元模型(图3). 本文为了提高计算效率,分别采用梁-壳混合单元(Shell181-Beam188)和全实体单元(Solid185)进行有限元建模,并对比了相关计算单元数和效率(见表1). 模型的材料参数:弹性模量 $E = 195 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$,密度 $\rho = 7\,850 \text{ kg/m}^3$.

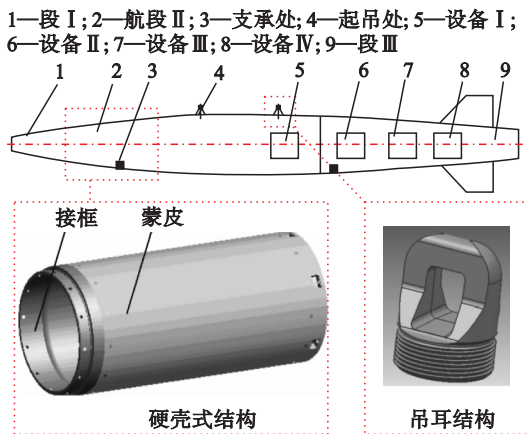


图 1 某型制导炸弹弹上设备及部件安排布置图
Fig. 1 Arrangement diagram of equipment and components on the body of a guided bomb

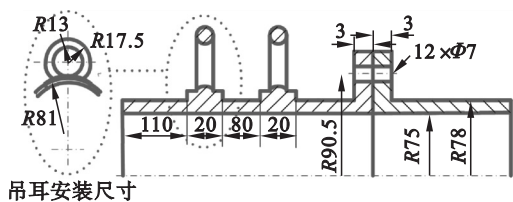


图 2 螺栓连接-吊挂式薄壁柱壳结构几何参数
Fig. 2 Geometric parameters of bolted-suspended thin-walled cylindrical shells

在全实体模型中,螺母、螺栓头与法兰的接触通过接触单元 Conta174 和目标单元 Targe170 建立绑定接触对,而法兰之间的接触对则是采用相同的单元(Conta174-Targe170)建立标准接触且界面摩擦系数设置为 0.2 ^[12]. 在梁-壳混合模型中,整体建模采用壳单元,螺栓建模采用梁单元,法兰间的界面接触通过 Conta174-Targe170 单元构建标准接触,螺母-法兰/螺栓头-法兰作用区域采用梁的端节点与作用区域刚性绑定来进行模拟.

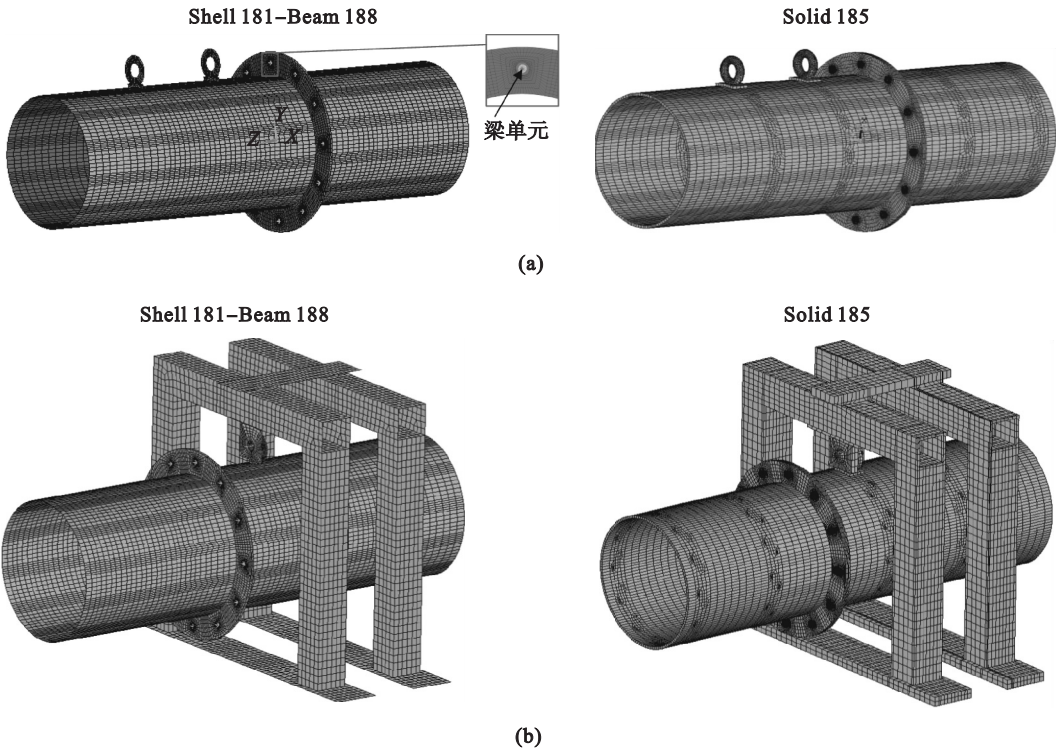


图 3 螺栓连接薄壁圆柱壳结构有限元模型
Fig. 3 Finite element model of bolted thin-walled cylindrical shell
(a)—自由边界; (b)—约束边界.

基于 ANSYS 软件中的预紧力单元 Prets179 实现螺栓预紧力的施加. 预紧力的计算公式:

$$T = kFd. \tag{4}$$

式中: F 和 T 分别为预紧力和拧紧力矩; k 为拧紧力矩系数; d 为螺栓公称直径. 本文中, $T = 6\text{ N}\cdot\text{m}$, $k = 0.2^{[13]}$, $d = 6\text{ mm}$. 本文假定螺栓同时拧紧, 进而对接触压力及其分布进行分析.

1.3 接触压力试验验证

选用 FUJIFILM 压力测量胶片对螺栓连接的接触压力分布进行测量. 图 4 表明 12 个螺栓的压力分布几乎一致, 因此, 试验仅需测试其中 1 个螺栓的压力分布. 此处选用低压 (2.5 ~ 10 MPa) 和高压 (10 ~ 50 MPa) 压力试纸分别进行测量. 当接触压力超过压感试纸的最低感压值时, 压力试纸将显示为图 4 中的灰色区域.

图 4 将试验结果与仿真结果进行了对比验证. 从图中可以看出: 梁-壳混合单元模型和实体单元两种模型的接触面上的接触压力分布趋势一致, 即两法兰接触面间的接触压力呈圆形分布, 且随着接触压力分布区域逐渐靠近圆心, 压力值不断增大.

在图 4a 中, 低压试纸染色半径 $r_1 \approx 6.5\text{ mm}$, 且高压试纸的染色半径 r_2 明显小于低压试纸染色半径 r_1 , 验证了上述接触压力分布规律, 而在图

4b 和图 4c 中大于 10 MPa 接触压力的接触半径 $r_3 \approx r_4 \approx 7.5\text{ mm}$, 比试验测得的半径 r_1 大, 这是由于试验件的法兰接触面由于加工误差等原因, 没有保证绝对平整, 但这并不影响验证接触压力的分布规律.

表 1 列出了采用实体/混合模型对图 4 进行计算时所需的单元信息、节点信息和计算时间. 从表中可以看出, 梁-壳混合单元模型比实体单元模型具有更少的单元数以及更高的计算效率. 基于此, 混合模型将被用于后续部分的仿真分析 (在约束模态分析中, 实体模型的计算时间是 9 min 14 s, 混合单元模型的计算时间是 1 min 58 s, 可以看出计算效率有很大的提高).

2 系统固有特性分析

本节主要研究了自由/约束边界条件下, 螺栓连接-吊挂式薄壁柱壳的模态特性, 并通过试验进行了对比验证. 在仿真与试验验证时, 拧紧力矩均为 6 N·m.

2.1 自由边界下系统固有特性

自由边界条件下的有限元模型如图 3a 所示. 图 5 为搭建的自由模态测试台, 试验所用加速度传感器为联能 CA-YD-125 压电式加速度传感

器. 试验中采用对角多次拧紧的方式对螺栓进行预紧,然后将试验件通过橡皮绳悬挂于刚性杆,从

而模拟自由边界.

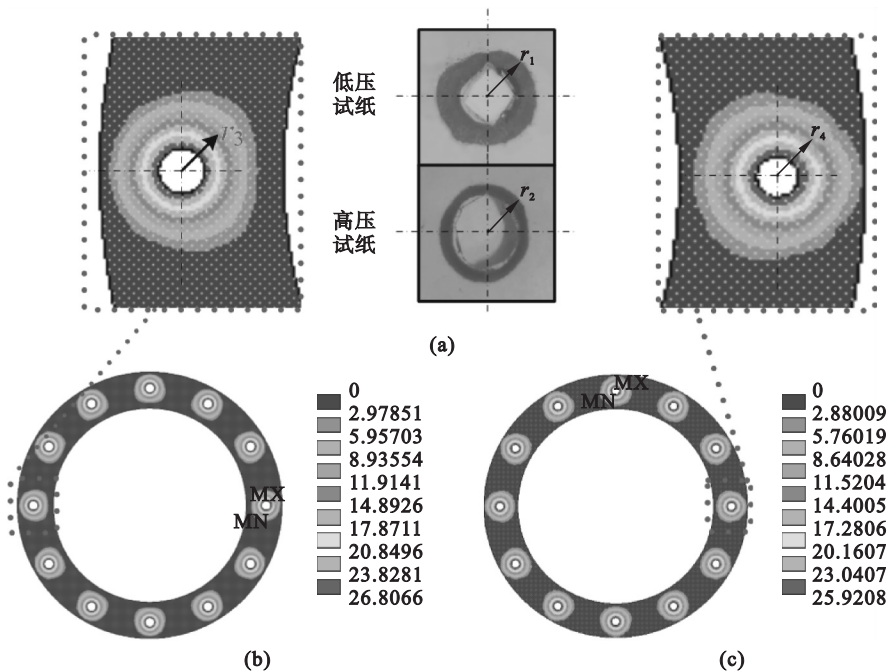


图 4 试验结果与仿真结果对比
Fig. 4 Comparison between experimental results and simulation results
(a)—试纸检测结果; (b)—实体单元接触压力; (c)—混合单元接触压力.

表 1 不同建模方法单元数以及计算效率
Table 1 Element number and computational efficiency of different modeling methods

单元信息	实体模型	混合模型
实体单元数量	45 243	—
实体单元节点数	62 224	—
壳单元数量	—	38 826
壳单元节点数	—	40 090
梁单元数量	—	48
梁单元节点数	—	72
接触单元数量	8 352	10 440
接触单元节点数	9 180	11 040
目标单元数量	6 120	10 440
目标单元节点数	7 392	11 040
计算时间/s	151	85

为测得结构的振型图,在所测薄壁圆柱壳上布置 96 个测点,如图 6 所示. 其中,沿圆周方向分布有 16 个测点,薄壁柱壳的轴向分布有 6 个测点. 测试过程中,在图 6 的 A 点布置一个单向加速度传感器,采用多点输入单点输出的模态测试方法对薄壁圆柱壳进行固有特性的测试,振型图通过测试系统来进行绘制.

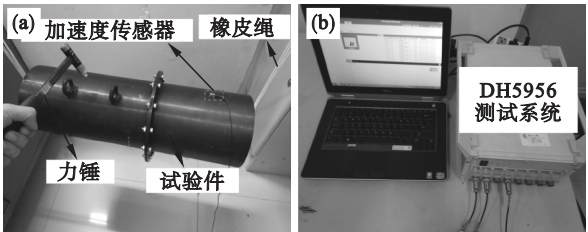


图 5 试验件与分析测试系统
Fig. 5 Test piece and test system

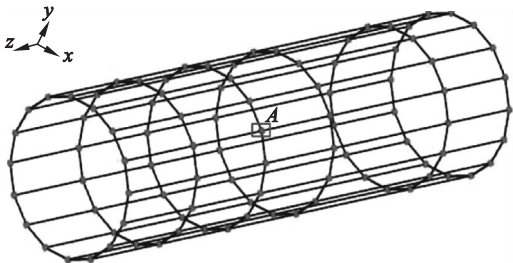


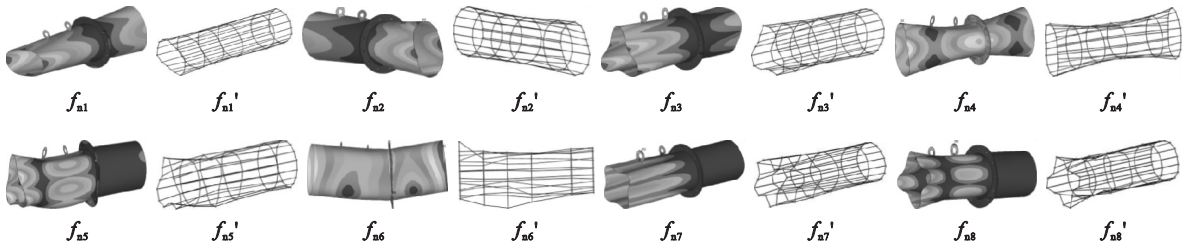
图 6 自由模态试验测点
Fig. 6 Test point infree mode

表 2 列出了试验和仿真得到的系统前 8 阶固有频率. 从表中可以看出,试验和仿真所得固有频率吻合较好,从而验证了所建立模型的有效性. 图 7 给出了系统前 8 阶振型图的仿真与试验结果.

表 2 自由边界条件下前 8 阶固有频率对比结果
Table 2 Comparison of the first eight natural frequencies under free boundary conditions

固有频率	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	f_{n4}
试验结果/Hz	335.1	551.8	922.9	1 208
仿真结果/Hz	335.23	553.55	924.76	1 191.1
相对误差/%	0.04	0.32	0.20	-1.40

固有频率	f_{n5}	f_{n6}	f_{n7}	f_{n8}
试验结果/Hz	1 448	1 655	1 752	1 976
仿真结果/Hz	1 453.3	1 678.74	1 759.8	1 953.5
相对误差/%	0.37	1.43	0.45	-1.14



注:图中 f_{ni} 表示第*i*阶仿真振型图, f_{ni}' 表示第*i*阶试验振型图
图 7 自由边界条件下仿真与试验前 8 阶振型图对比

Fig. 7 Comparison between simulation and first eight-order mode shapes under free boundary conditions

沿圆周方向均匀布置 8 个测点,而沿轴向布置 3 个测点.

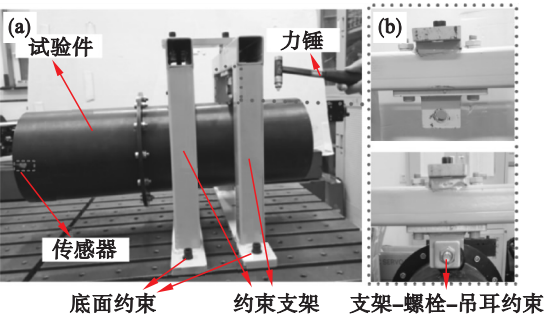


图 8 约束模态试验测试示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the constrained modal test

(a)—约束模态试验测试;(b)—试验约束位置放大图.

基于图 8 所示的试验测试结构与测点布置,对结构进行约束模态的试验测试.由于本文主要关心吊挂式薄壁柱壳结构的振动特性,因此,只考虑薄壁柱壳本身的振型结果,所测得结构的前 8 阶固有频率由表 3 列出.前 8 阶仿真振型图与试验结果对比,如图 9 所示,由图可知仿真和实测振型吻合良好.

2.2.1 法兰处螺栓预紧力的影响

图 10 为吊挂处螺栓连接预紧力不变的情况下,法兰处螺栓预紧力对系统固有频率的影响.从图中可以看出,随着螺栓预紧力的增大,系统的固

2.2 约束边界下系统固有特性分析

考虑吊挂边界约束的影响,分别采用试验(图 8)和仿真(图 3b)分析了系统的固有特性.基于所建立的有限元模型,进一步分析了法兰以及吊挂处螺栓预紧力对系统固有特性的影响.需要说明的是,法兰处用 M6 螺栓预紧,而吊挂处则采用 M10 螺栓预紧.

图 9 表明约束模态的振型不同于自由模态(图 7),其周向波数主要发生在高频,而低频主要表现为俯仰或周向波数较少的振型,且轴向波数较少.约束模态试验中的测点分布及测点数为

表 3 吊装边界条件下前 8 阶固有频率对比结果
Table 3 Comparison of the first eight natural frequencies under hoisting boundary conditions

固有频率	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	f_{n4}
试验结果/Hz	43	77.778	94.833	222.17
仿真结果/Hz	40.247	82.516	94.899	214.6
相对误差/%	-6.40	6.09	0.07	-2.32

固有频率	f_{n5}	f_{n6}	f_{n7}	f_{n8}
试验结果/Hz	371.742	493.086	564.52	633.62
仿真结果/Hz	359.83	486.03	556.59	621.01
相对误差/%	-3.20	-1.43	3.04	-2.82

有频率不断增大.这主要是由于螺栓预紧力的增大导致了螺栓连接处法兰的弹性变形增大,结合面贴合更加紧密,螺栓连接刚度增大.此外,法兰处螺栓预紧力对系统前 4 阶固有频率影响较小,因为前 4 阶振型主要表现为以吊挂为中心的摆动与俯仰振型.表 4 为图 10 的具体数值结果.

2.2.2 吊挂处螺栓预紧力的影响

图 11 为法兰处螺栓连接预紧力不变的情况下,吊挂处螺栓预紧力对系统固有频率的影响.从图中可知,随着预紧力的增大,系统固有频率不断提高,并且可以看出:相比于法兰连接处的螺栓预紧力,吊挂处的螺栓预紧力对系统前 3 阶固有频

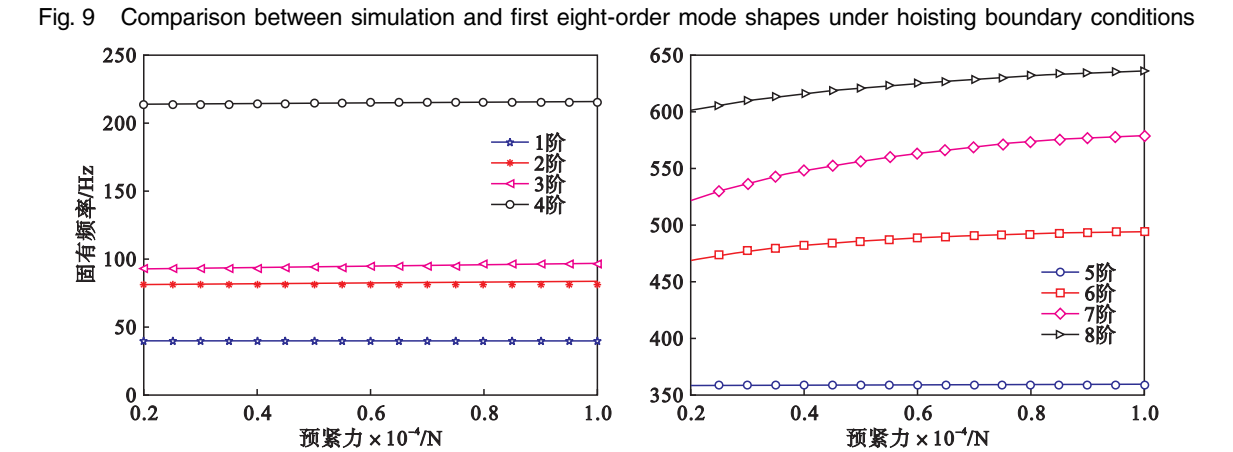
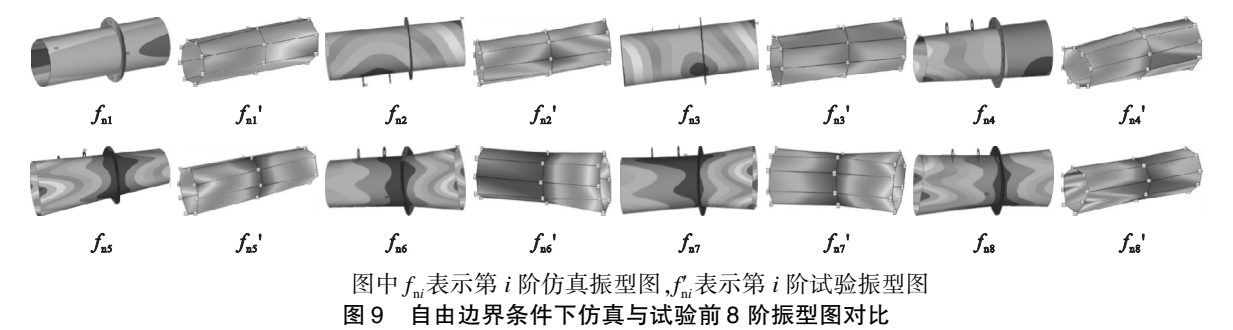


图 10 法兰螺栓处不同预紧力下系统的固有频率

Fig. 10 Natural frequency of the system under different pre-tightening forces at flange bolts

表 4 法兰螺栓处不同预紧力下系统的固有频率值

Table 4 Value of the natural frequency of the system under different pre-tightening forces at flange bolts Hz

预紧力/kN	2	4	6	8	10
f_{n1}	40.14	40.22	40.27	40.30	40.33
f_{n2}	81.38	82.19	82.78	83.25	83.62
f_{n3}	92.92	94.31	95.38	96.22	96.92
f_{n4}	213.68	214.38	214.79	215.07	215.27
f_{n5}	359.24	359.66	359.97	360.21	360.40
f_{n6}	469.47	482.58	488.73	492.40	494.62
f_{n7}	521.49	548.51	563.27	573.10	579.37
f_{n8}	601.63	616.12	625.28	631.81	636.22

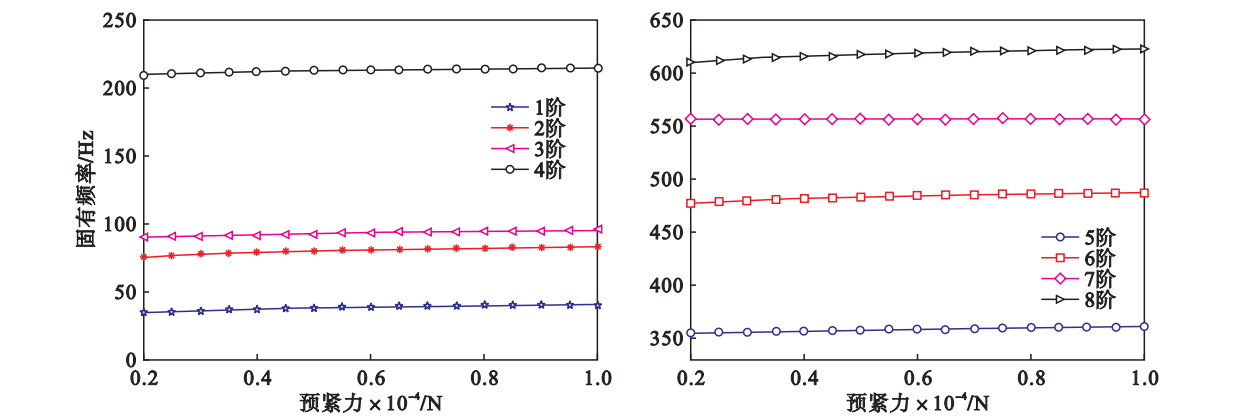


图 11 约束位置处不同螺栓预紧力下系统的固有频率

Fig. 11 Natural frequency of the system under different pre-tightening forces at constrained position

率影响较大,对第 4 ~ 8 阶固有频率影响较小,这 主要是因为约束边界条件下系统的前 3 阶振型主

要俯仰型. 为了从量的角度更清楚地了解影响的具体变化数值.
程度,表 5 为固有频率随约束位置处预紧力变化

表 5 约束位置处不同预紧力下系统的固有频率值
Table 5 Value of the natural frequency of the system under different pre-tightening forces at the constraint position

预紧力/kN	2	4	6	8	10
f_{n1}	34. 82	37. 40	39. 07	40. 25	41. 15
f_{n2}	75. 44	79. 41	81. 29	82. 52	83. 41
f_{n3}	90. 70	92. 46	93. 80	94. 90	95. 74
f_{n4}	210. 35	212. 55	213. 78	214. 60	215. 24
f_{n5}	354. 30	356. 78	358. 52	359. 83	360. 78
f_{n6}	477. 27	481. 82	484. 41	486. 03	487. 17
f_{n7}	556. 32	556. 59	556. 78	556. 59	556. 72
f_{n8}	610. 07	615. 47	618. 82	621. 01	622. 65

3 结 论

- 1) 在保证求解精度的条件下,本文建立的梁-壳混合单元建模比实体单元建模的求解效率更高.
- 2) 建立吊挂约束之后,薄壁柱壳-支架耦合系统的固有频率降低了很多,且薄壁柱壳结构低阶振型存在俯仰型,吊耳处螺栓连接对薄壁柱壳结构振动特性有很大影响.
- 3) 当吊挂处螺栓预紧力一定时,随着法兰连接处螺栓预紧力的增大,系统第 5~8 阶固有频率变化最明显且呈逐渐增大的趋势;当法兰连接处螺栓预紧力一定时,吊挂处螺栓预紧力对系统前 3 阶固有频率具有明显影响,且随预紧力的增大呈增大趋势.

参考文献:

[1] 樊富友,刘林海,陈军,等. 制导炸弹结构总体分析与设计 [M]. 西安:西北工业大学出版社,2016.
(Fan Fu-you, Liu Lin-hai, Chen Jun, et al. Analysis and design of the overall structure of the guided bomb [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2016.)

[2] 张琪,刘莉. 导弹固有特性的有限元分析 [J]. 弹箭与制导学报,2008(2):12-13,18.
(Zhang Qi, Liu Li. Finite element analysis of missile inherent properties [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*,2008(2):12-13,18.)

[3] Liu S G, Wang J, Hong J, et al. Dynamics design of the aero-engine rotor joint structures based on experimental and numerical study [C]//ASME Turbo Expo 2010; Glasgow, 2010:49-60.

[4] Tanlak N, Sonmez F, Talay E. Detailed and simplified models of bolted joints under impact loading [J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*,2011,46(3):1-13.

[5] Boeswald M, Link M, Meyer S. Experimental and analytical investigations of non-linear cylindrical casing joints using base excitation testing [C]//Proceeding of International Modal Analysis Conference. Kissimmee,2003.

[6] Montgomery J. Methods for modeling bolts in the bolted joint [C]//ANSYS User's Conference. Orlando,2002.

[7] Kwon Y D, Gu N S, Kim S Y, et al. Finite element modeling for static and dynamic analysis of structures with bolted joint [J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*,2002,26(4):667-676.

[8] Kim J, Yoon J C, Kang B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints [J]. *Applied Mathematical Modeling*,2007,31(5):895-911.

[9] Li H, Zhu M, Xu Z, et al. The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary [J]. *Shock and Vibration*,2016(3):1-15.

[10] Chang X L, Zhou W. Contact model based on augmented Lagrange method and its engineering application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2004,23(9):1568-1573.

[11] 张文胜,徐世俊,孟春晓,等. 螺栓连接薄壁柱壳结构固有特性分析 [J]. 动力学与控制学报,2018,16(6):568-574.
(Zhang Wen-sheng, Xu Shi-jun, Meng Chun-xiao, et al. Analysis of inherent characteristics of bolted thin-walled cylindrical shell [J]. *Journal of Dynamics and Control*,2018,16(6):568-574.)

[12] 栾宇. 航天器结构中螺栓法兰连接的动力学建模方法研究 [D]. 大连:大连理工大学,2012.
(Luan Yu. Study on dynamic modeling of bolted flange connections in aerospace structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2012.)

[13] Wang T, Yu S R, Zheng X Y, et al. Numerical analysis and test study of bolted structure [J]. *Applied Mechanics and Materials*,2010,26/27/28:231-235.