

螺栓连接薄壁柱壳结构固有特性分析*

张文胜¹ 徐世俊¹ 孟春晓² 李坤² 马辉^{2†} 秦朝烨³

(1.上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245) (2.东北大学 机械工程与自动化学院,沈阳 110819)

(3.清华大学 机械工程系,北京 100084)

摘要 本文以螺栓连接的薄壁柱壳结构为研究对象,基于 ANSYS 有限元分析软件,建立其精细有限元模型,并采用基于接触的预应力法分析系统的固有特性,通过与模态实验得到的系统振型和固有频率结果进行对比,验证所建模型的有效性和准确性,并在此基础上,分析系统转速和螺栓预紧力对系统固有特性的影响.研究表明:随着转速和预紧力的增加,结合面的连接刚度和系统刚度增加,系统的前6阶固有频率不断增加;转速较低时,预紧力对系统的固有特性的影响占主导;预紧力足够大时,转速对系统的固有频率的影响占主导.

关键词 螺栓连接, 薄壁柱壳, 固有特性, 预紧力, 转速

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-081

引言

机械装配中的连接形式种类繁多,有螺栓连接、胶结、焊接、销连接等形式^[1],且连接结构的装配性能及其稳定性是目前国内外研究的热点之一,因此如何正确处理零部件之间的连接关系或装配关系是一个十分重要的技术问题^[2].目前,螺栓连接作为机载设备设计制造中一种常用的连接方式,因其具有加工方便、可操作性好、承载能力强、便于装配、可靠性高、便于拆卸等优点^[3],被广泛应用于转子系统的连接结构中.

在工程实际中,为改善螺栓连接结构的刚度、提高连接精度、防止松动的发生,多数情况下需要对装配螺栓进行适当预紧^[4,5],并且预紧力和连接面的接触状态对连接结构的固有特性影响较大.为了研究包含螺栓连接结构的复杂机械力学特性^[6],国内外很多学者对螺栓连接结构的建模进行了大量的研究和分析.

Maio 等^[7]将螺栓连接简化为刚性连接,但这种分析方法很难考虑连接件间的接触特性,会导致整个连接结构的振动模态计算结果偏大.Kim 等^[8]考虑了螺栓预紧效应和法兰之间的接触行为,采用

预应力模态法分析螺栓连接结构,该方法具有较高的准确性.在有限元方法的基础上,Marc 等^[9]基于实验测试结果,采用线性弹簧、非线性弹簧单元、阻尼单元对螺栓连接结构进行了建模.姚星宇等^[10,11]则将有限元和解析相结合,针对螺栓连接薄壁筒结构,推导了连接刚度理论表达式,进而采用薄层单元来模拟螺栓连接界面,探究了螺栓预紧力对结构固有特性的影响.文献^[12,13]认为螺栓连接结构的预紧力夹紧区域为类圆锥形,并提出将预紧力夹紧区域进行粘接可应用于螺栓建模中,但其仅适用于大预紧力情况.工程实际中,由于预紧力的施加,螺栓连接结构界面接触摩擦问题不可避免^[14-17].因此,针对螺栓连接薄壁结构应考虑预紧力对其固有特性的影响.文献^[18,19]分析了螺栓连接结构在不同预紧力下的固有特性,结果表明,预紧力对系统的固有特性影响较大,且预紧力越大,系统的固有频率越高.此外,在对螺栓连接结构的固有特性进行研究时,Wei 等^[20]研究了螺栓数目及螺栓位置对系统固有频率的影响,研究结果表明随着螺栓数目的增加,系统固有频率不断增加,且螺栓间距越大,螺栓数量对固有频率的影响越明显.

根据上述文献可知,在螺栓连接结构方面,对

2018-10-11 收到第1稿,2018-10-18 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(11772089),中央高校基本科研业务费专项基金(N160312001, N170308028)资助项目,装备预研领域基金项目(61402100102),装发联合基金(6141B0210201)

† 通讯作者 E-mail:mahui_2007@163.com

于螺栓连接结构的建模方法的研究比较系统,对于连接结构界面接触特性的研究内容较为丰富,研究模型已经从集中参数模型逐渐发展到三维实体模型,研究内容已经从线性范围逐步扩展非线性范围.然而,在螺栓连接的薄壁柱壳结构方面,较少有文献考虑转速和预紧力联合作用下对系统固有特性的影响.基于这一点,本文首先基于 ANSYS 仿真软件,建立了典型的螺栓连接薄壁柱壳结构;其次通过仿真与实验模态结果对比,验证了基于接触的预应力模态法求解系统固有频率的有效性;最后考虑离心刚化、旋转软化和科式力效应,探究了螺栓预紧力和系统转速对螺栓连接薄壁筒结构的固有特性的影响.

1 有限元模型及模型验证

1.1 接触力学模型

在螺栓连接结构中,接触区域的接触状态与载荷、材料、边界条件等因素相关,且对结构动力特性影响较大.因此,需要采用合理的接触算法来描述螺栓连接件间的接触问题.常见的接触算法包括罚函数法、拉格朗日乘子法和增广的拉格朗日乘子法^[21].罚函数法在求解复杂接触问题时容易导致收敛困难,拉格朗日乘子法则会导致迭代次数的增加,而增广拉格朗日乘子法通过将罚函数中的罚项加入到拉格朗日乘子法中,提高了计算精度,改善了收敛性.因此,本文采用增广拉格朗日乘子法来处理连接件间的接触问题.

基于 Hamilton 原理得到系统的能量泛函表达式如下:

$$\Pi(u) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\Pi_1 + \Pi_2 + \int_{\Gamma_c} \left(\frac{1}{2} \alpha (g_N)^2 + \lambda_N g_N \right) ds \right) dt \quad (1)$$

式中, $\Pi(u)$ 为系统总能量, Π_1 和 Π_2 分别为系统的动能和势能, Γ_c 为接触边界, α 和 λ^N 分别为罚度和拉格朗日乘子, g_N 为接触间隙.

基于有限元法的基本理论,将式(1)中进行变分和离散化处理后,可得到含接触问题的系统自由振动微分方程如下:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku - B_c \lambda_N(\alpha) = 0 \\ K = K_e + K_s + K_\sigma(\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中, M 、 C 、 K_e 、 K_s 和 $K_\sigma(\alpha)$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、结构刚度矩阵、旋转软化矩阵以及离

心力和预紧力共同作用下导致的初应力矩阵, u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 、 B_c 分别为系统的位移、速度、加速度及接触约束矩阵.

值得说明的是,本文仅进行含螺栓连接的旋转薄壁柱壳结构的固有特性分析,因此,式(2)可进一步简化为如下表达式:

$$M\ddot{u} + (K_e + K_s + K_\sigma(\alpha))u - B_c \lambda_N(\alpha) = 0 \quad (3)$$

此外,由于系统涉及到接触问题,因此,接触点间还应满足接触界面的非穿透和库伦摩擦条件:

$$\begin{cases} \lambda_N^i(\alpha) \geq 0 \\ g_N^i \leq 0 \\ \lambda_N^i(\alpha) g_N^i = 0 \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (3)$$

$$\|t_T^i\| \leq \mu \lambda_N^i(\alpha) \quad (4)$$

其中,上标 i 表示第 i 个接触对, q 表示接触对数, $\lambda_N^i(\alpha)$ 是拉格朗日乘子; t_T^i 表示界面摩擦力; g_N^i 表示第 i 个接触对的正常间隙; μ 表示摩擦系数.

相关求解含接触的系统刚度矩阵 K 的计算流程图如图1所示.基于所获得的 K 和 M ,便可求得预应力状态下系统的固有频率和振型.

1.2 有限元模型建立与验证

图2为螺栓连接薄壁柱壳结构示意图,薄壁柱壳结构几何参数如下:左盘半径为 $R=150$ mm,长为 $L_1=20$ mm,右盘直径为 $R=150$ mm,长为 $L_2=25$ mm,左右筒结构相同,内半径 $R_1=117$ mm,外半径 $R_2=120$ mm,长为 $L=160$ mm,法兰螺栓孔中心圆半径 $R_3=126$ mm,外圆半径 $R_4=132$ mm,法兰厚 $h=3$ mm,螺栓孔直径 $d=5$ mm.其中,两薄壁柱壳结构通过24个M4标准螺栓、螺母进行连接.

真实试验件结构中增加了厚度($H=25$ mm)和外径($D=240$ mm)相同的两个法兰盖板,其中法兰盖板和两筒盖通过24个M20螺栓完全拧紧,因此,在建立有限元模型时,忽略了法兰盖板和两筒盖之间的接触非线性,将法兰盖板和筒盖进行一体化建模.建模时,基于 ANSYS 软件,采用实体单元(Solid185单元)建立螺栓连接的薄壁柱壳精细有限元模型,其中材料参数设置如下:弹性模量210 GPa,泊松比0.3,密度 7800 kg/m³;接触设置如下:采用接触单元 Targe170 和 Conta174 模拟螺栓头与左筒、螺母与右筒、左右筒之间的接触与摩擦,摩擦系数设置为0.15;采用预紧力单元 Prets179 模拟螺栓预紧力,通过查询机械设计手册确定螺栓预紧力大小为800 N.

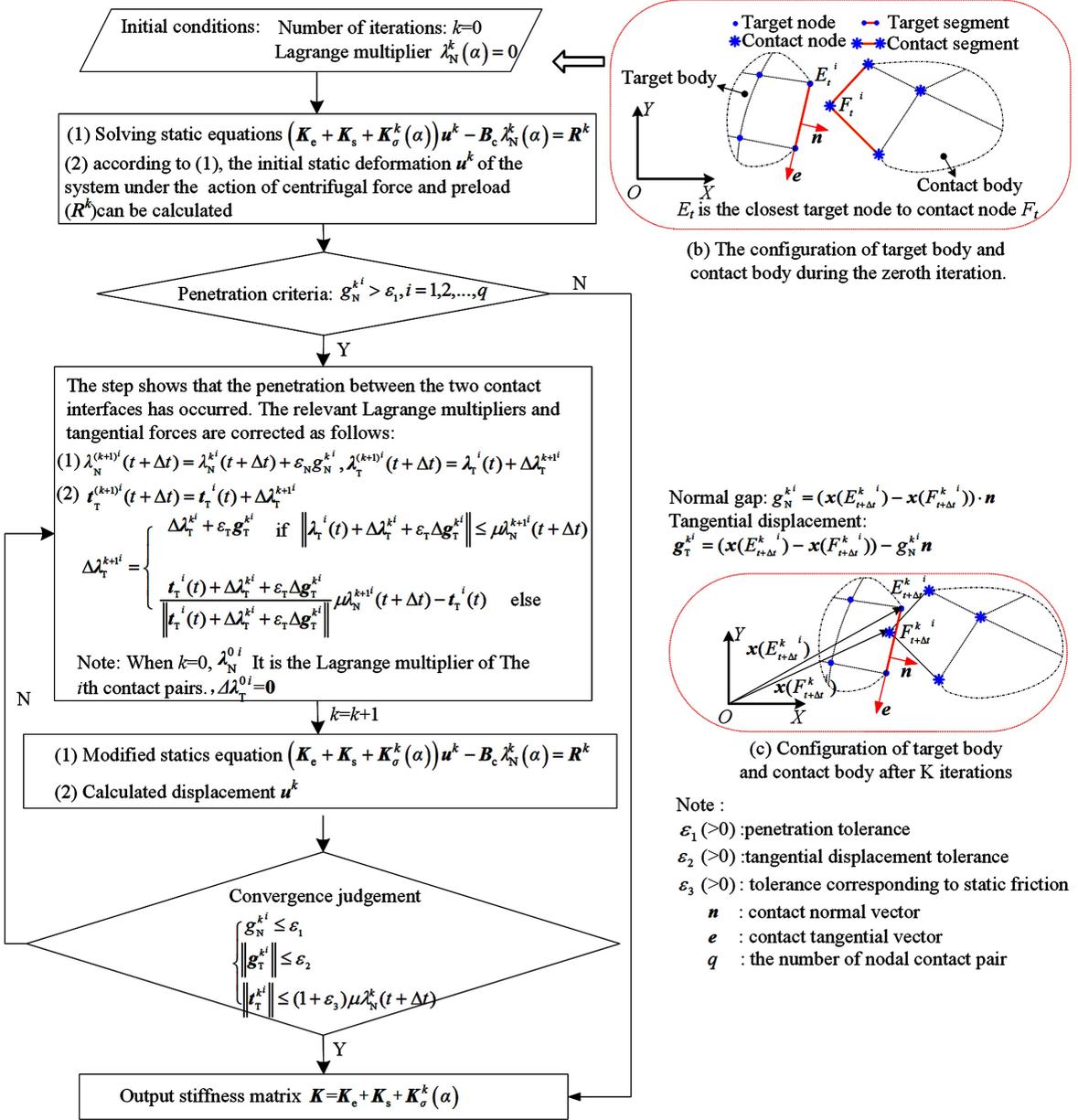


图1 基于接触动力学的接触求解流程图

Fig.1 Flow chart of solution based on contact dynamics

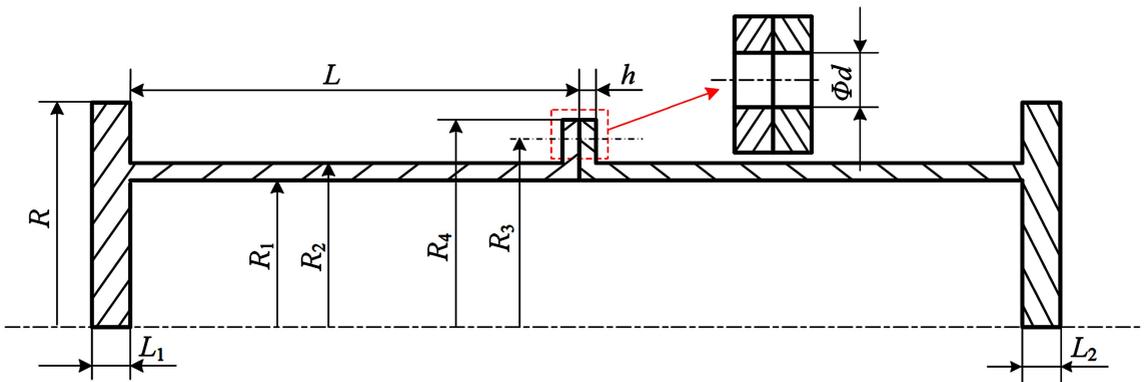


图2 螺栓连接薄壁柱壳结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of bolted thin-walled cylindrical shells

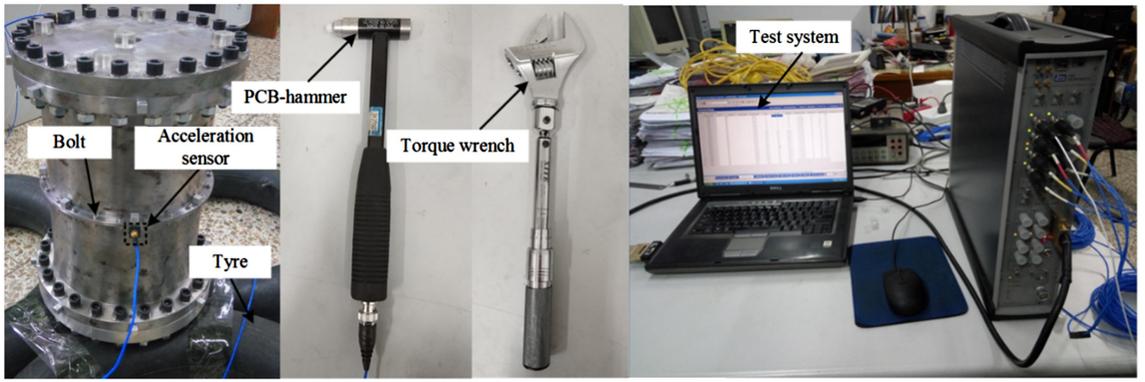


图 3 试验件和分析系统

Fig.3 Test piece and analysis system

为了验证所建模型的正确性,本节对该螺栓连接的薄壁柱壳结构进行实验验证.实验过程中采用 LMS SCADAS III 型振动测量系统及其配套的 TestLab 软件进行数据的测试和分析,采用 PCB 公司的力锤进行敲击,扭矩扳手施加预紧力和三向加速度传感器进行数据采集.具体的测试系统、实验件、测试工具和辅助设备,如图 3 所示.

实验件安放在未充满的轮胎上面以此来模拟自由边界条件.螺栓连接的薄壁柱壳结构共分布 24 个测试点(见图 4),在上下筒连接处中间圆周方向均布 8 个测点,在上下筒圆周方向各均布 8 个测点,三向加速度传感器安装在中间连接处和上筒面.测量时,仪器的设定频率测量范围为 0~4096 Hz,采用锤击法测量螺栓连接薄壁柱壳结构的固有频率及振型图.

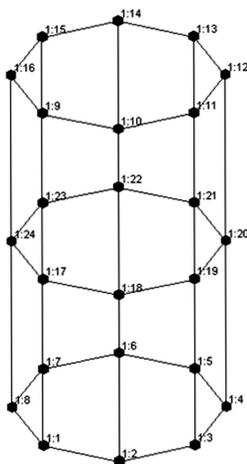


图 4 试验件敲击点

Fig.4 Knocking point of test piece

基于上文的建模方法和实验方案,得到螺栓连接的薄壁柱壳结构在自由边界条件下的前 6 阶固

有频率和振型,并将有限元结果与实验结果进行对比.具体频率对比结果和振型对比结果分别如表 1 和图 5 所示,其中,第 1 阶、第 2 阶、第 4 阶和第 6 阶模态为结构向波数振型,第 3 阶模态为结构扭转振型,第 5 阶模态为结构剪切搓动振型.需要说明的是,本文采用 f_{ni} 代表第 i 阶固有频率.

表 1 前 6 阶仿真与实验结果固有频率对比

Table 1 Comparison of the first 6 order natural frequencies between simulation and experimental results

Natural frequency	f_{n1} (Hz)	f_{n2} (Hz)	f_{n3} (Hz)	f_{n4} (Hz)	f_{n5} (Hz)	f_{n6} (Hz)
Experimental result	899.5	1182.5	1338.4	1693.7	1929.8	2047.1
Simulation result	903.1	1187.9	1356.7	1654	1966.2	2010.4
Relative error (%)	0.40	0.46	1.37	-2.35	1.89	-1.80

Note: error = (simulation - experiment) / experiment

2 螺栓连接旋转薄壁筒固有特性分析

本小节考虑旋转软化、离心刚化和陀螺效应,对螺栓连接薄壁柱壳结构施加转速效应,分析螺栓预紧力和转速耦合作用下对系统固有特性的影响.仿真参数设置如下:预紧力的变化范围为 800~3000 N,转速分别为 0 r/min、3000 r/min、6000 r/min.通过 ANSYS 仿真软件,得到系统的前 6 阶固有频率随预紧力和转速的变化曲线如图 6 所示.

观察图 6 可知:

(1)随着螺栓预紧力的增加,系统的前 6 阶固有频率不断增加,预紧力越大,系统的前 6 阶固有频率增加程度越小,这是因为,螺栓预紧力越大,左右两筒结合的越牢固,结合面的连接刚度越大,从而导致系统的固有频率不断增大.

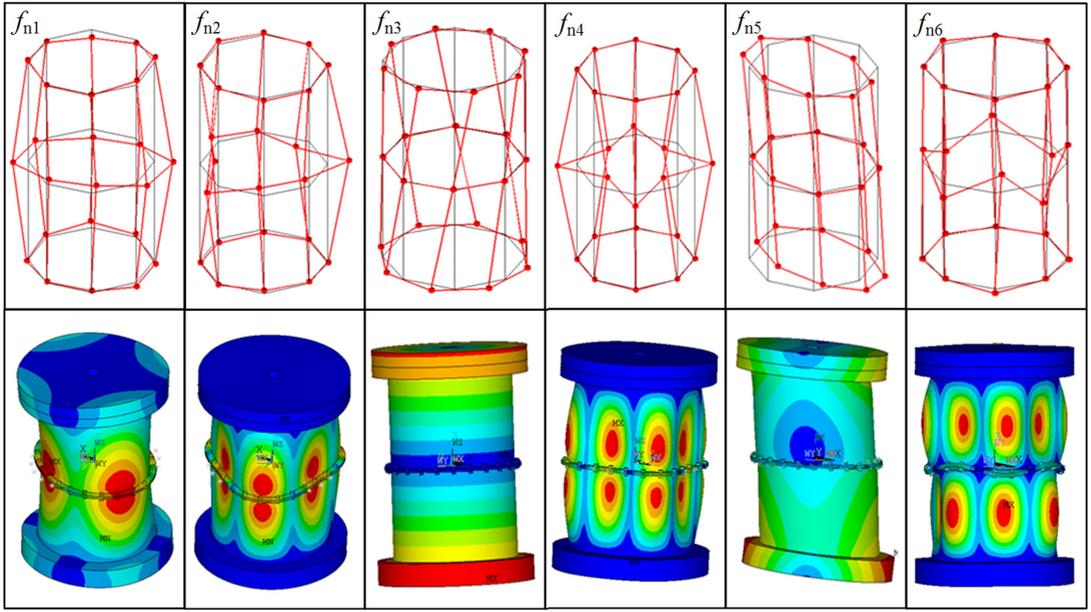


图5 仿真与实验振型图对比

Fig.5 Comparison of simulation and experiment mode shapes

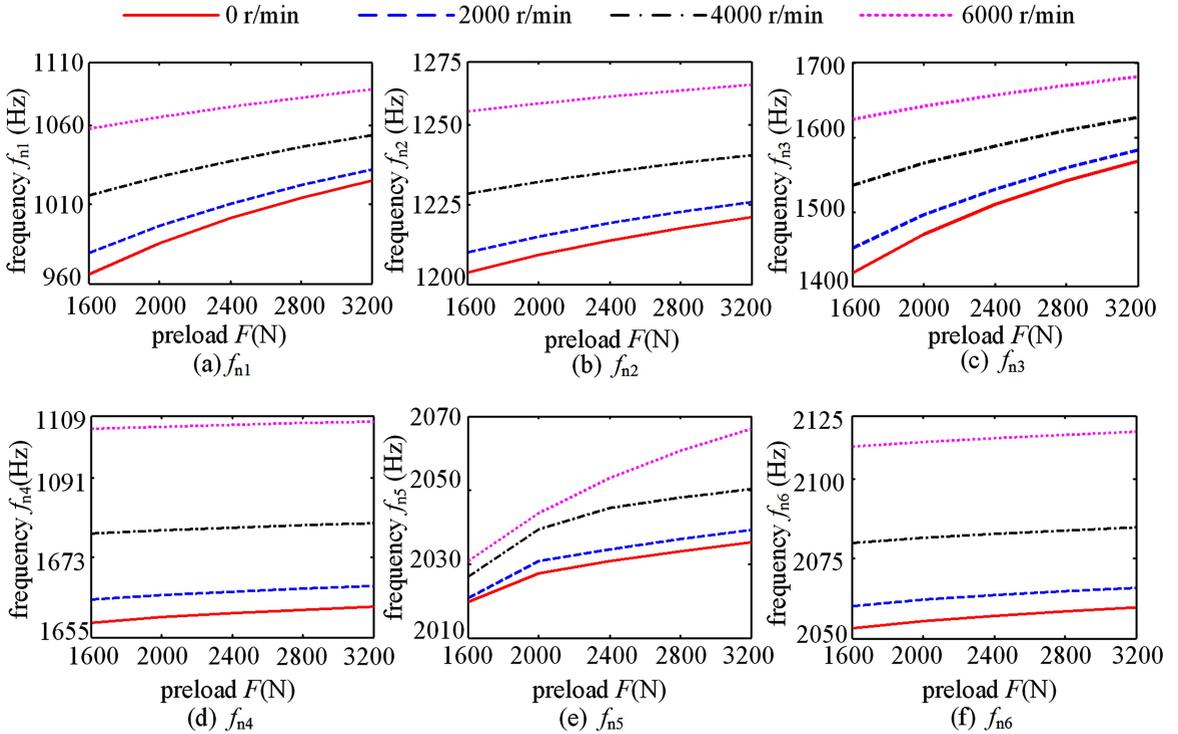


图6 不同预紧力和转速下系统前6阶固有频率

Fig.6 The first 6 natural frequencies of the system under different preload and speed

(2) 随着系统转速的增加,系统的前6阶固有频率不断增加,转速越高,结合面的接触面积增大,系统的刚化效应越明显,从而导致结合面的接触刚度和系统的整体结构刚度越大,系统的固有频率不断增大。

(3) 预紧力足够大时,系统的固有频率的变化主要是由于转速引起的,也间接说明转速对其固有特性的影响程度要大于预紧力对其固有特性的影响。

3 结论

本文以螺栓连接薄壁柱壳结构为研究对象,首先基于 ANSYS 有限元分析软件,建立精细有限元模型,其次通过与自由边界条件下实验得到的振型和固有频率对比,验证仿真模型的准确性和有效性,最后,探究了螺栓预紧力和系统转速耦合作用下对结构固有特性的影响规律.结论如下:

(1)在对螺栓连接薄壁柱壳结构进行模态求解时,基于接触的预应力模态法计算精度较高,仿真与实验结果最大误差约为 -2.35% ,证明本文建立的螺栓连接薄壁筒结构精细有限元模型的准确性和合理性.

(2)随着转速和预紧力的增加,结合面的连接刚度和系统的结构刚度不断增加,系统的前6阶固有频率不断增加,转速较低时,预紧力对系统的固有特性的影响占主导;当预紧力足够大时,系统的固有频率的变化主要是由转速引起.

参 考 文 献

- 1 机械设计实用手册编委会. 机械设计实用手册(精). 北京:机械工业出版社, 2008 (Editorial board for practical manuals of mechanical design. Practical handbook for mechanical design. Beijing: Machinery Industry Press, 2008 (in Chinese))
- 2 赵猛,张以都,马良文等. 装配结构模态仿真与实验对比研究. 振动与冲击, 2005, 24(1): 28~29 (Zhao M, Zhang Y D, Ma L W, et al. Comparative study on modal simulation and experiment of assembly structure. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(1): 28~29 (in Chinese))
- 3 濮良贵,陈国定,吴立言. 机械设计(第9版). 北京:高等教育出版社, 2013 (Pu L G, Chen D G, Wu L Y. Machine design (Edition 9). Beijing: Higher Education Press, 2013 (in Chinese))
- 4 Bickford J H, Saunders H, Bickford J H, et al. An introduction to the design and behaviour of bolted joints. Marcel Dekker Inc., New York, 1981, 442
- 5 张锡大. 挤压螺栓推力终止系统在固体火箭发动机中的应用. 上海航天, 1988(4): 51~54 (Zhang X D. Application of extruded bolt thrust termination system in solid rocket motor. *Shanghai Aerospace*, 1988(4): 51~54 (in Chinese))
- 6 刘红宝,李红兵,滕浩等. 复杂振动工况下低温阀门焊接波纹管动态特性研究. 上海航天, 2016, 33(S1): 153~157 (Liu H B, Li H B, Teng H, et al. Dynamic characteristics of welded bellows for low temperature valves under complicated vibration conditions. *Shanghai Aerospace*, 2016, 33(S1): 153~157 (in Chinese))
- 7 Maio D D, Schwingshackl C, Sever I A. Development of a test planning methodology for performing experimental model validation of bolted flanges. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 83(1-2): 983~1002
- 8 Kim J, Yoon J C, Kang B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(5): 895~911
- 9 Boeswald M, Link M, Meyer S. Experimental and analytical investigations of non-linear cylindrical casing joints using base excitation testing. In: International Modal Analysis Conf, Kissimmee, Florida, 2003
- 10 姚星宇,王建军,翟学. 航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2269~2279 (Yao X Y, Wang J J, Zhai X. Thin layer element modeling method for Aeroengine bolt connection. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(12): 2269~2279 (in Chinese))
- 11 Jalammanavar K, Kasina L, Srinivasan R K, et al. Bolted joint simulation techniques in gas turbine components. In: ASME 2014 Gas Turbine India Conference. American Society of Mechanical Engineers, New Delhi, India, 2014
- 12 Fernlung I. A method to calculate the pressure between bolted or riveted plates. Sweden: Chalmers University of Technology, 1961
- 13 Kwon Y D, Kwon H W, Hwangbo J H, et al. Finite element modeling for static and dynamic analysis of structures with bolted joint. In: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, 2006, 306: 547~552
- 14 郭铮. 摩擦型高强螺栓连接受力性能有限元分析. 甘肃科技, 2009, 25(11): 91~93 (Guo Z. Finite element analysis of mechanical behavior of friction high-strength bolt connections. *Gansu Science and Technology*, 2009, 25(11): 91~93 (in Chinese))
- 15 郑战光,蔡敢为,李兆军. 含螺栓预紧力的汽车钢圈强度分析. 机械设计与制造, 2009(8): 219~220 (Zheng Z G, Cai G W, Li Z J. Strength analysis of automotive steel wheel with bolt. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2009(8): 219~220 (in Chinese))
- 16 谢慧敏,马岳峰,韩建保. 螺栓连接件的有限元仿真计

- 算. 现代制造工程, 2002(1):48~49 (Xie H M, Ma Y F, Han J B. The FEM simulation of workpiece connected by bolts. *Modern Manufacturing Engineering*, 2002(1): 48~49 (in Chinese))
- 17 Qin Z Y, Han Q K, Chu F L. Bolt loosening at rotating joint interface and its influence on rotor dynamics. *Engineering Failure Analysis*, 2016,59:456~466
- 18 Yao X, Wang J, Zhai X. Research and application of improved thin-layer element method of aero-engine bolted joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, DOI: 10.1177/0954410016643978, 2016
- 19 Zang C, Yang J, Friswell M I. Robust tolerance design in structural dynamics//Simmermacher T, Cogan S, Moaveni B, et al. Topics in model validation and uncertainty quantification, Volume 5. New York; Springer, 2013
- 20 Wei L D, Duan S L, Xing Q L, et al. Modal experiments and finite element analysis of the bolted structure considering interface stiffness and pretension. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 2012,17(2):87~94
- 21 Chang X L, Zhou W. Contact model based on augmented lagrange method and its engineering application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9):1568~1573

ANALYSIS OF INHERENT CHARACTERISTICS OF BOLTED THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS *

Zhang Wensheng¹ Xu Shijun¹ Meng Chunxiao² Li Kun² Ma Hui^{2†} Qin Zhaoye³

(1. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Company Limited, Shanghai 200245, China)

(2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Liaoning 110819, China)

(3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In this paper, the thin-walled cylindrical shell with bolted connections was taken as the research object, and the finite element model was established based on ANSYS. The natural characteristics of the system were analyzed by the contact-based prestressing method, which was verified by experimental results. The influence of rotating speed and bolt preload on the inherent characteristics of the system was analyzed. The results show that, with the increase in the speed and preload, both the connection stiffness and system stiffness increase, and the first six natural frequencies of the system increase continuously. When the speed is low, the preload has a greater impact on the natural characteristics of the system. However, when the preload is large enough, the speed dominates the change of the natural frequencies.

Key words bolted connection, thin-walled cylindrical shell, inherent characteristics, preload, speed