

文章编号:1000-8055(2011)05-1142-06

碳陶双基体复合材料壳结构的振动分析

张大义, 洪 杰, 任德新

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对某碳陶双基体复合材料的冲压发动机燃烧室衬套结构, 在缺少复合材料机械性能参数的情况下, 提出一种振动分析的工程实用方法. 建立了衬套结构的有限元模型, 通过固有振动特性和随机载荷环境中的振动响应计算分析, 对结构的动力学设计进行评估, 为复合材料壳结构的振动分析以及冲压发动机中典型壳结构的动力学设计和评估提供参考.

关 键 词: 复合材料; 壳结构; 振动; 有限元分析; 谱分析

中图分类号: V23

文献标志码: A

Dynamical analysis on shell structure made of C/C-SiC composite materials

ZHANG Da-yi, HONG Jie, REN De-xin

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An effective engineering method was put forward to solve the dynamical problems of a ramjet combustion chamber liner made of C/C-SiC composite materials, in the absence of mechanical performance parameters of materials. The finite element model of liner was erected, and natural characteristics and vibration responses caused by random excitation were calculated. Then the design level was evaluated based on dynamical thesis. The study has a great reference value for vibration analysis on shell structure made of composite materials and dynamical design on shell structure used in ramjet.

Key words: composite materials; shell structure; vibration; finite element analysis; spectrum analysis

近年来碳陶双基体复合材料(C/C-SiC)由于具有低密度、高强度、抗氧化、耐热冲刷、耐烧蚀性能优良等优点,在航空航天发动机的热端部件中得到了广泛的应用.

由于设计需求,针对陶瓷基复合材料结构的振动分析成为国外的一个研究热点^[1-4],而国内针对碳陶复合材料结构的相关研究重点主要集中在材料力学性能^[5-6]以及制备工艺等^[7],与振动相关的分析和动力学设计评估鲜有报道.而在工程实

践中,由于结构总是处于不同程度的振动环境中,因此发动机的失效往往与振动和噪声有关^[8-9],如某冲压发动机燃烧室内衬套为 C/C-SiC 复合材料,在地面试车 300 s 左右出现机匣烧穿现象,烧穿区为周向均布的 4 个位置,初步分析认为破坏形式与壳体 2 节径振型相关,振动过大引起内层复合材料剥落,进而引起大面积燃烧,但由于结构设计中没有进行动力学分析工作,也没有相关的参考资料,故障难以准确定位和彻底排除,限制了

收稿日期:2010-05-05; 修订日期:2010-06-05

作者简介:张大义(1979—),男,辽宁抚顺人,博士后,主要从事航空发动机振动及振动控制研究.

研制进程。

本文针对此冲压发动机燃烧室衬套结构,在缺少复合材料机械性能参数的情况下,提出一种振动分析的工程实用方法。通过固有振动特性和随机载荷环境中的振动响应计算分析,对结构的动力学设计进行评估,为复合材料壳结构的振动分析以及冲压发动机中典型壳结构的动力学设计和评估提供参考。

1 概述

1.1 结构概述

某冲压发动机燃烧室衬套由内层、加强层和垫块组成,如图1所示。其中内层为针刺预制体增强的C/C-SiC,内层轴向分为三段,插接后用胶固接;加强层为碳/酚醛树脂补强层,均匀缠绕于内层外,所有部位的纤维缠绕方向均为周向,纤维间使用胶粘接,主要用于提高结构静强度和抗振能力;垫块为玻璃钢材料,是4个窗口式结构,沿周向均布,用于整体衬套的安装。

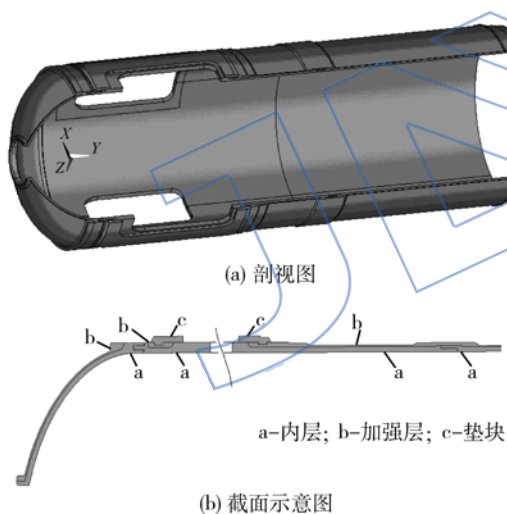


图1 燃烧室衬套结构示意图

Fig. 1 Sketch of combustion chamber liner

1.2 分析方法

对于此衬套结构的振动分析主要有两个难点问题:其一,内层和加强层均使用宏观各向异性材料,在振动分析中每种材料都需要弹性特性的9个计算参数,其中碳/酚醛树脂的材料数据由相关材料所提供,而衬套的主体结构内层所使用的C/C-SiC复合材料,国内仅具备其部分机械性能数据,因此如何通过有限的材料数据获得可靠的分析结果是一个关键问题;其二是结构的激励环

境为随机噪声,因此其振动响应分析和评估不能使用传统的谐响应或瞬态响应分析方法。

本文提出一种在缺少材料参数情况下适合于工程问题的结构振动分析和评估方法,流程如图2所示。

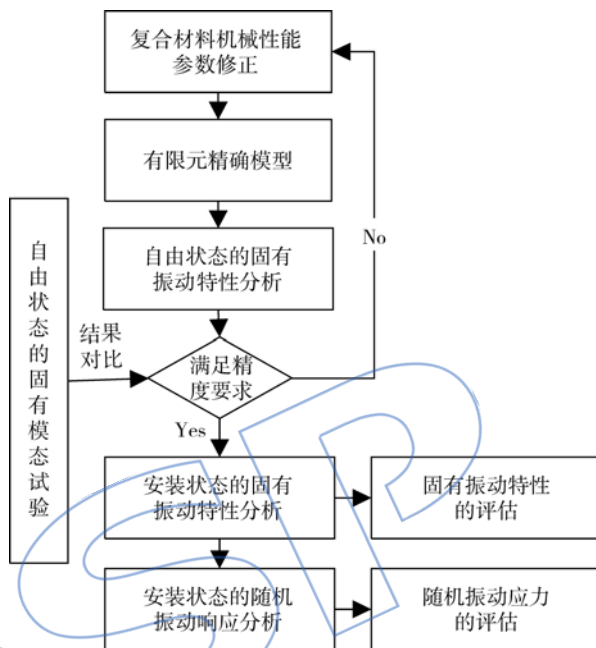


图2 分析流程

Fig. 2 Analysis process

2 自由状态的固有振动特性分析

2.1 模态试验分析

采用多点激振、单点拾振方式的锤击法^[10]进行固有模态试验分析,衬套结构在自由状态下表现为典型的壳体振型。前六阶固有频率及振型参见表1和图3所示。

表1 衬套结构前六阶固有模态频率及振型

Table 1 Nature mode frequencies and mode shapes of liner

阶数	固有频率/Hz		振型描述	相对误差/%
	试验结果	计算结果		
1	133.5	133.7	$m=2, n=1$	0.1
2	313.9	309.1	$m=2, n=2$	1.5
3	339.5	332.4	$m=2, n=2$	2.1
4	438.3	383.4	$m=3, n=2$	12.5
5	593.5	528.0	$m=3, n=3$	11.0
6	633.3	664.3	$m=4, n=1$	4.9

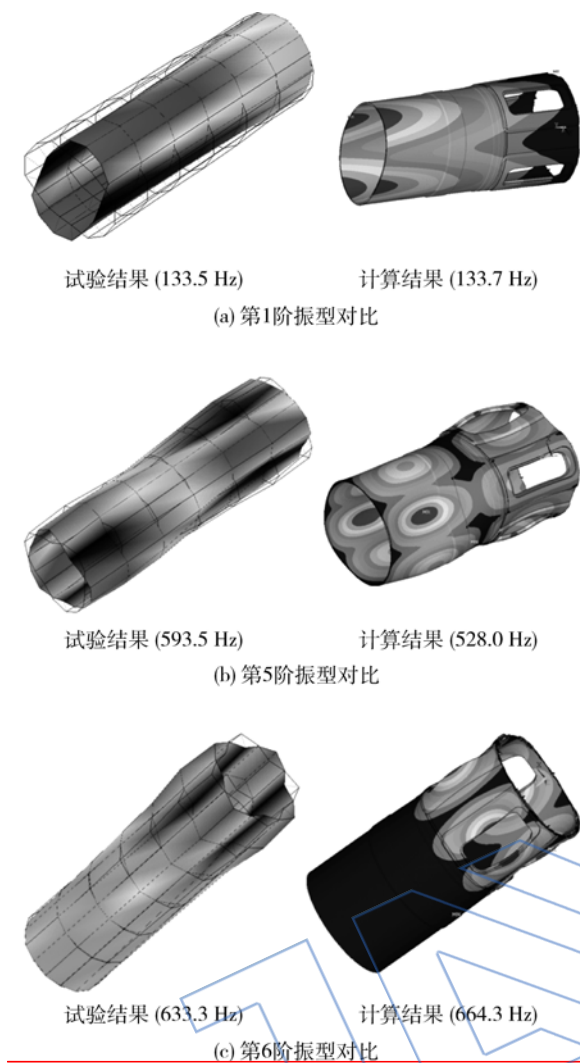


图3 典型振型对比

Fig. 3 Comparison of typical mode shapes

2.2 有限元计算分析

依据试验结果,对分析模型的材料性能参数进行反复修正,最终求得在自由状态下结构的固有振动特性,并与模态试验结果进行对比,如表1和图3所示.振型描述中, m 代表周向全波数, n 代表轴向半波数.

2.3 分析结果

通过对结构处于自由状态的固有振动特性分析,初步结论如下:

1) 燃烧室衬套结构在 $10 \sim 2000$ Hz 的频率范围内,具有丰富的固有频率成分,结构的各阶振型表现为壳体结构的典型振动形式,在圆周方向为全波数为 m ($m=0,1,2,3,\dots$) 的振型,在轴向上为半波数为 n ($n=1,2,3,\dots$) 的振型.

2) 通过试验校正,在计算中按表2给定材料参数,可使各阶固有振型具有较好的一致性,而各阶固有频率值的计算相对误差均小于15%,可以满足工程问题的计算需求.因此,此计算模型可用于实际安装状态的固有振动特性分析和振动响应分析.

表2 C/C-SiC 复合材料机械性能参数

Table 2 Mechanical performance parameters of C/C-SiC used in calculation

性能参数	方向	数值
拉伸弹性模量/GPa	X	33.6
	Y	<u>67.2</u>
	Z	<u>67.2</u>
	XY	<u>0.11</u>
泊松比	YZ	<u>0.11</u>
	XZ	<u>0.11</u>
密度/(g/cm ³)	XY	3.36
	YZ	6.72
	XZ	3.36
剪切模量/GPa	XY	3.36
	YZ	6.72
	XZ	3.36

注:表中 X 为径向,Y 为周向,Z 为轴向.表中下划线数据为材料所提供的已知参数,无下划线数据为计算中的拟合参数.

3 安装状态的固有振动特性分析

根据衬套结构的实际安装状态,在进气口垫块的外表面 A 施加径向和周向位移约束,进气口垫块后端定位面 B 施加轴向周向位移约束,燃烧室前端凸台圆柱定位面 C 和后端插接位置 D 施加径向位移约束,如图4所示.

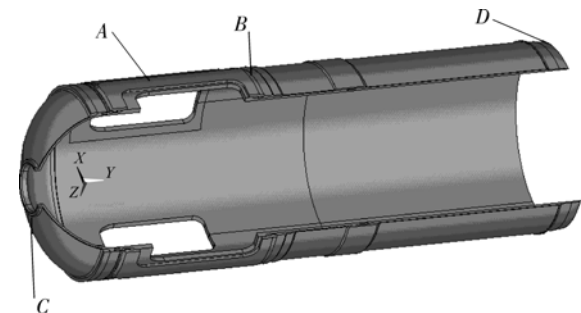
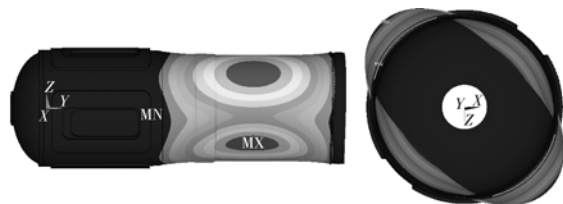


图4 边界条件示意图

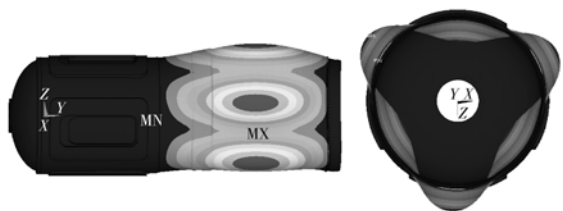
Fig. 4 Sketch of boundary condition

3.1 计算结果

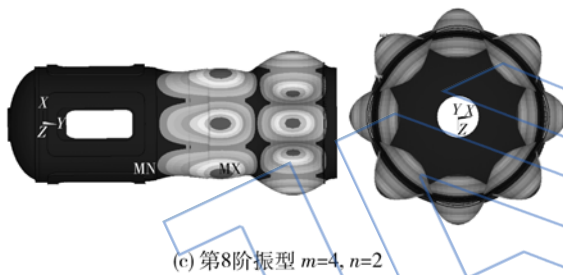
由安装状态下的计算结果,在 10~2 000 Hz 的频率范围内,燃烧室内层具有丰富的固有频率成分,求得各阶固有频率及典型振型如表 3 和图 5 所示。



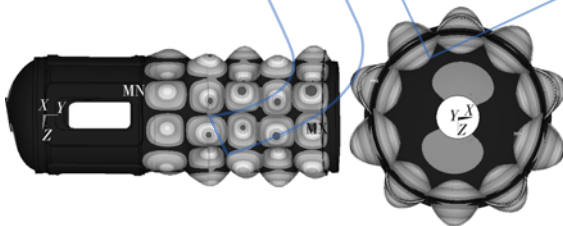
(a) 第1阶振型 $m=2, n=1$



(b) 第2阶振型 $m=3, n=1$



(c) 第8阶振型 $m=4, n=2$



(d) 第29阶振型 $m=5, n=5$

图5 安装状态典型振型图

Fig. 5 Typical mode shapes while mounted

3.2 结果分析及设计评估

安装状态下,衬套结构在 10~2 000 Hz 的频率范围内,具有丰富的固有频率成分,其振型主要为后段区域的壳式振动;在振动环境中,后段壳体沿周向、轴向有多个位置的振动幅值区域,成为整个结构动力设计的薄弱处。

考虑增压泵激励主频率以及结构的动力设计规定,衬套结构应当避开 20, 40 Hz 和 200 Hz 的激振频率。因此,就固有振动特性而言,此衬套结构满足动力设计要求。

表3 各阶固有频率及振型(10~2 000 Hz)

Table 3 Nature mode frequencies and mode shapes between 10 Hz and 2 000 Hz

阶数	固有频率/Hz	振型描述	振型图
1	428.85/436.46	$m=2, n=1$	图 5(a)
2	466.75	$m=3, n=1$	图 5(b)
⋮	⋮	⋮	⋮
8	908.93/911.97	$m=4, n=2$	图 5(c)
⋮	⋮	⋮	⋮
29	1922.4	$m=5, n=5$	图 5(d)

4 随机振动环境下的结构动力响应分析

由于气流的流动和可燃气体的燃烧,燃烧室衬套处于宽频带的噪声激励中。冲压发动机燃烧室噪声包括燃烧噪声、房间响应和进气道带来的附加噪声等,其中燃烧噪声是燃烧室噪声的主要来源。而燃烧噪声的主要成分是燃烧吼声,它是可燃气体燃烧造成压力升高和释放热量的结果,一般随机噪声载荷的高能量区在 500~1 200 Hz 之间^[11]。根据试验测试和相关设计规定,确定衬套结构所处环境的功率谱密度曲线如图 6 所示。

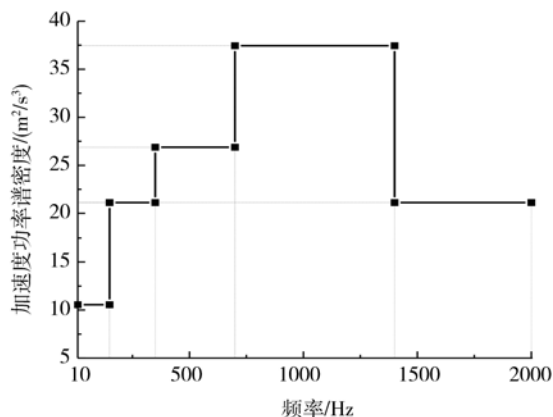


图6 随机环境功率谱密度曲线

Fig. 6 Power spectrum density of random excitation

4.1 计算结果

基于随机振动理论,采用动力学谱分析方法,对结构的随机振动响应进行求解^[12-13]。针对某点径向位移响应值,绘制功率谱密度响应曲线,如图 7 所示。可见,结构在随机载荷作用下,主要对

$m=2$ 和 $m=4$ 的节径型振动敏感,将表现为多阶振型叠加的响应特征。

求得结构位移分布和应力分布的 1σ 结果如图8~图11所示。 1σ 结果的物理意义为:如某结构在随机谱激励下的最大位移位于X位置,对应的位移值为0.15 mm,则此结构的最大位移将出现在X位置,而X位置的位移达到或小于0.15 mm的几率为68%(1σ);随机振动结果也使用 3σ 值表示,其物理意义为达到或小于的几率为98%。

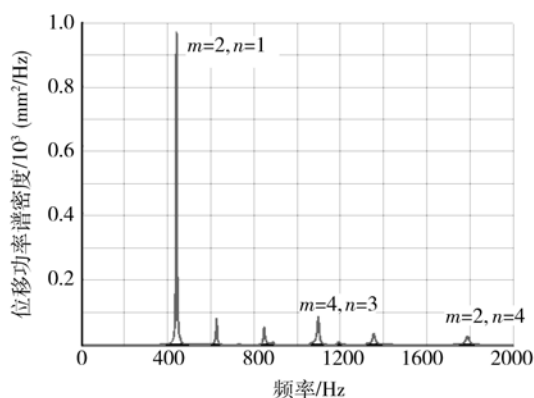


图7 结构振动响应功率谱密度曲线

Fig. 7 Power spectrum density of vibration response

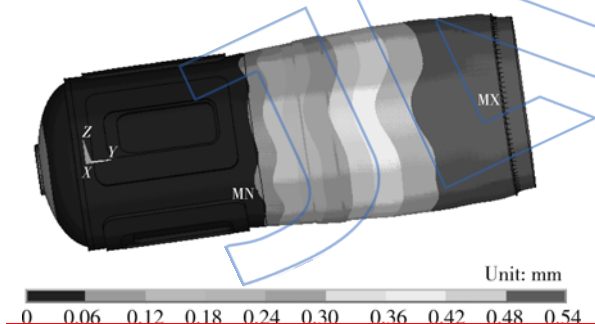


图8 合位移分布

Fig. 8 Contour of displacement vector sum

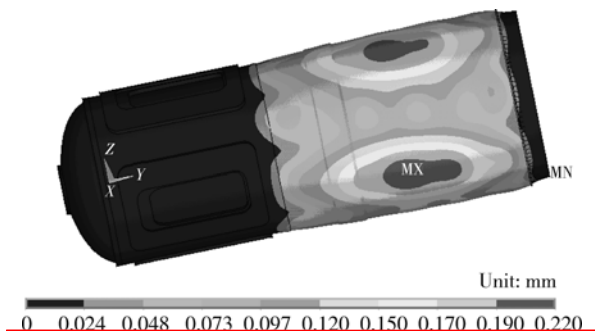


图9 径向位移分布

Fig. 9 Contour of radial component of displacement

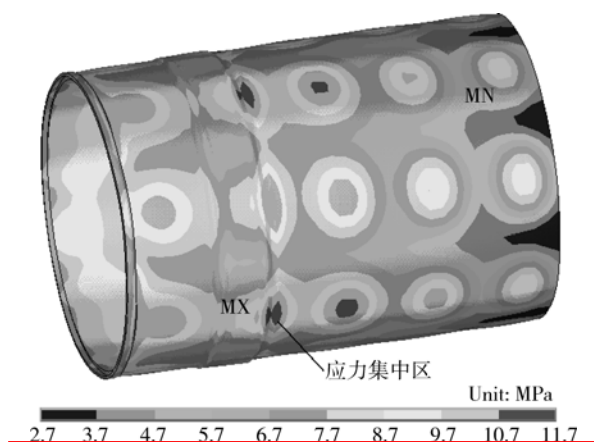


图10 等效应力分布

Fig. 10 Contour of Von Mises stress

4.2 结果分析及设计评估

对于发动机结构设计一般应使用 3σ 值,因此根据计算结果有如下结论:

1) 在随机激励下,衬套结构表现为 $m=2$, $m=4$ 的多阶节径型振动的叠加。

2) 振动应力幅值区域为沿周向均布的4个位置,出现在壳体后段的加强筋位置附近,按照98%的置信度,结构振动的等效应力幅值为35.1 MPa,振动位移幅值为1.62 mm。

由于对结构所使用的复合材料没有相关的疲劳数据,因此针对振动响应的设计评估还有赖于后续的构件疲劳试验工作。

5 结论

针对某冲压发动机燃烧室衬套结构进行振动分析和评估,本文的主要工程价值如下:

1) 对于缺少机械性能参数的复合材料结构,提供一种进行振动分析的工程实用方法。

2) 为碳陶双基体复合材料壳结构的振动分析以及冲压发动机中典型壳结构的动力学设计和评估提供参考。

6 研究展望

针对此衬套结构,需要进一步开展以下两个方面的研究工作。

6.1 材料构件疲劳性能的试验研究

由于碳陶双基体复合材料没有疲劳性能的相关数据,因此文中计算的随机振动应力对结构造成的损伤程度无法评估,后续工作中,拟通过试验方法,对材料构件在振动环境下的疲劳性能进行

测试,从而为结构动力学设计提供重要依据。

6.2 基于振动响应的结构优化设计

由振动固有特性和振动响应分析结果,衬套结构的后段振动响应较大,后段壳体沿周向、轴向有多个位置的振动幅值区域,成为整个结构动力设计的薄弱处,而结构实际工作中也确实在后段壳体出现过与振动相关的故障模式,因此拟通过仿真计算进行基于振动响应的结构优化设计,在振动响应大的区域采取局部加强措施,增加局部刚度,调整模态分布,寻找降低振动响应的结构最优方案。

参考文献:

- [1] Mital S K, Murthy P L N. Characterizing the properties of a C/SiC composite using micromechanics analysis [R]. AIAA-2001-1363, 2001.
- [2] Murthy P L N, Nemeth N N, Brewer D N, et al. Probabilistic analysis of a SiC/SiC ceramic matrix composite turbine vane [R]. NASA Report NASA/TM-2004-213331, 2004.
- [3] Hald H, Ullmann T. Reentry flight and ground testing experience with hot structures of C/C-SiC material [R]. AIAA 2003-1667, 2003.
- [4] Srivastava V K, Maile K. Measurement of critical stress intensity factor in C/C-SiC composites under dynamic and static loading conditions [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(9): 1209-1217.
- [5] 陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 2D 机织陶瓷基复合材料应力-应变行为 [J]. 力学季刊, 2009, 30(4): 588-596.
- TAO Yongqiang, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Stress strain behavior in 2D weave ceramic matrix composite [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2009, 30(4): 588-596. (in Chinese)
- [6] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2003(1): 24-32.
- ZHANG Litong, CHENG Laifei, XU Yongdong. Progress in research work of new CMC-SiC [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1): 24-32. (in Chinese)
- [7] 蒋云, 陈照峰, 朱建勋. 三向正交碳纤维增强纳米碳化硅生物复合材料的制备和力学性能 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(6): 97-101.
- JIANG Yun, CHEN Zhaofeng, ZHU Jianxun. Preparation and mechanical property of nanometer silicon carbide biological composites reinforced by 3D orthogonal carbon fibers [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(6): 97-101. (in Chinese)
- [8] Aykan M, Çelika M. Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 897-907.
- [9] Huls R A, Sengissen A X, Van der Hoogt P J M, et al. Vibration prediction in combustion chambers by coupling finite elements and large eddy simulations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(1): 224-229.
- [10] 段合朋, 张立民, 何远新, 等. 基于试验模态安全吊焊缝开裂原因分析 [J]. 噪声与振动控制, 2010(1): 89-92.
- DUAN Hepeng, ZHANG Limin, HE Yuanxin, et al. Analysis of welding seam split of safety hangers based on experimental modal analysis [J]. Noise and Vibration Control, 2010(1): 89-92. (in Chinese)
- [11] Stephenson J, Hassan H A. The spectrum of combustion-generated noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 53(2): 283-288.
- [12] Asthana A K, Datta T K. A simplified response spectrum method for random vibration analysis of flexible base buildings [J]. Engineering Structures, 1990, 12(3): 185-194.
- [13] Li Q S, Zhang Y H, Wu J R, et al. Seismic random vibration analysis of tall buildings [J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1767-1778.