

# 聚合物基复合材料发动机体的模态试验分析

闻荻江<sup>1</sup>, 张 力<sup>2</sup>, 张 恒<sup>3</sup>

(1. 苏州大学材料工程学院, 苏州 215021; 2 北京工商大学机械自动化学院, 北京 100037; 3 郑州大学机械与电子工程学院, 郑州 450002)

**摘 要:** 该文针对复合材料发动机的振动问题, 进行了试制的复合材料发动机体的模态试验研究, 并利用计算机模态分析系统获得其前 5 阶模态参数及振型。试验表明, 复合材料发动机机体的固有频率较金属机体高, 同时因为机体复合材料属高内阻尼材料, 它的黏弹性能有助于增加振动阻尼, 因此, 复合材料发动机机体具有优良的减振降噪性能; 复合材料发动机机体的横向振动是比较严重, 需要采取措施改善横向振动特性。试验结果为其结构的改进设计提供了依据。

**关键词:** 复合材料; 发动机机体; 模态分析

**中图分类号:** S219 031; TB533+. 1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)02-0022-03

闻荻江, 张 力, 张 恒 聚合物基复合材料发动机体的模态试验分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 22- 24

Wen Dijiang, Zhang Li, Zhang Heng Modal experiment and analysis of resin based composite engine block [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 22- 24 (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

复合材料的比强度高、比刚度高、耐腐蚀、减震和降噪等一系列优点, 使其在机械材料领域中得到日益广泛重视和应用。复合材料发动机机体研究与应用则是一项重要的工作<sup>[1]</sup>, 但降低复合材料制造的发动机振动噪声仍是目前设计中的重要追求目标。

用模态试验分析方法研究工程问题是结构动力学领域的重大发展之一。近年来, 国内外已成功地应用于航空、航天、机械、飞机制造等工业部门的各种工程结构设计中。利用模态试验与分析研究方法是研究复合材料发动机振动特性的有效途径。

作者曾报道过国内首次采用 E-玻纤/改性酚醛复合材料, 分别采用可熔性型芯整体模压成型及传递模成型技术制备的发动机, 材料特性及发动机疲劳特性等<sup>[2-5]</sup>, 本文以国内首次用复合材料研制的 DA 462Q 汽车发动机机体为对象, 采用试验模态分析方法进行了研究, 获得了满意的结果, 为其动态分析和设计改进提供了依据, 为防振、隔振或消除振动, 提高该材料制备的发动机工作性能提供了可靠的参考。

## 1 试验模态分析原理

工程中的弹性结构可以离散化为有限个质量、弹性和阻尼元件组成的 N 自由度线性振动系统, 其动力学微分方程为<sup>[6]</sup>

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中  $[M]$ ——质量矩阵;  $[C]$ ——阻尼矩阵;  $[K]$ ——刚度矩阵;  $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ ——分别为各离散质量的 N 维位移、速度、加速度向量。

对方程两端作傅氏变换, 得

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{X(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2)$$

记  $[H(\omega)] = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])^{-1}$ , 则有

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (3)$$

式中  $[H(\omega)]$ ——系统的频响函数矩阵;  $\{X(\omega)\}$ ——响应  $\{x(t)\}$  的傅氏变换;  $\{F(\omega)\}$ ——激励  $\{f(t)\}$  的傅氏变换。

$[H(\omega)]$  也称为导纳矩阵, 其元素  $H_{1p}(\omega)$  的物理意义是, 其他点上激励为零时, 1 点响应谱与 p 点激励谱的复数比, 即

$$H_{1p}(\omega) = \frac{X_1(\omega)}{F_p(\omega)} \quad (4)$$

根据导纳矩阵的对称性质, 只要提高测试获得导纳矩阵的一行或一列元素, 便能确定整个导纳矩阵, 也能确定全部动态特性。

在结构阻尼或小阻尼时, 利用振型矩阵的正交性质, 可得模态参数与导纳矩阵关系式

$$[H(\omega)] = \sum_{i=1}^n \frac{\{Q_i\}\{Q_i^T\}}{k_i - m_i\omega^2 + j\omega c_i} \quad (5)$$

式中  $\{Q_i\}$ ——第 i 阶振型;  $k_i$ 、 $m_i$ 、 $c_i$ ——分别为第 i 阶模态刚度、质量、阻尼。

运用模态阻尼参数识别理论进行模态参数识别, 可以获得各阶模态参数。

## 2 试 验

### 2.1 试验对象

试验所用的发动机为 DA 462Q 车用发动机, 采用短切玻璃纤维/酚醛模压而成。

### 2.2 模态分析测试系统

模态分析测试系统见图 1 和图 2。

试验的激励方式为先采用锤击法激振, 有效锤击次数为 10 次以上, 在 7T 17S 信号分析仪上经分析, 确定各模态的固有频率; 后用激振器激振, 进行机体的模态试验<sup>[7]</sup>, 分析频率区间 0~ 2000 Hz, 频率分辨率 5 Hz。

### 2.3 试件的支承方式

悬吊点位于机体两端, 由软弹簧吊起, 所悬吊的弹

收稿日期: 2004-04-12 修订日期: 2004-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59575014)

作者简介: 闻荻江(1945-), 教授, 苏州市 苏州大学材料工程学院, 215021。Email: wendi@pub.sz.jsinfo.net



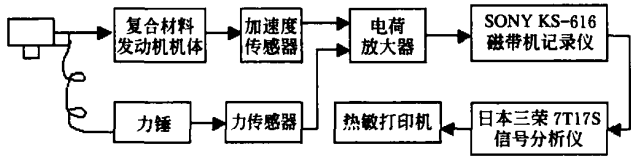


图 1 锤击法模态分析测试系统示意图

Fig 1 Diagram of the modal analysis and test system with hammer

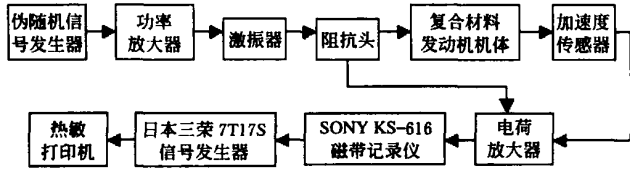


图 2 激振器激振模态分析测试系统示意图

Fig 2 Flow chart of the modal analysis and test system with an vibration exciter

簧具有 6 个刚度自由度的自由频率, 经实测都不大于 1 Hz, 比机体的弹性振动固有频率低得多。因此, 忽略弹簧的微小刚度, 机体可视为全自由度。

### 2.4 测点布置设计

根据机体的结构特点, 考虑激励允许的位置及测点数据能反映试件的动态特性等因素, 在机体 6 个平面布置了 56 个测点, 见图 3。

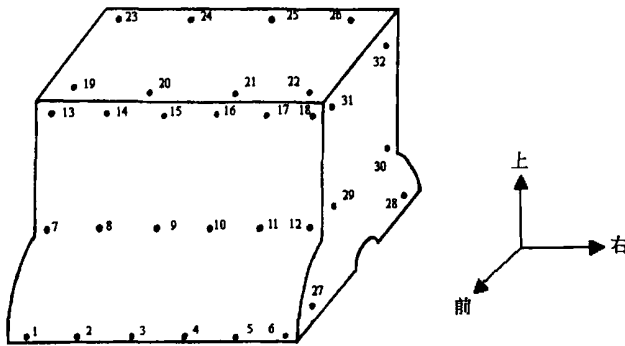


图 3 机体的测点布置

Fig 3 Testing point distribution of the engine block

测试金属材料时, 在传感器底部安装磁铁吸住被测物体即可。由于试验用机体为聚合物基复合材料, 为了使加速度传感器和力传感器能安装在测点上, 采用在传感器底部螺孔接上端部磨平的螺栓, 胶接在机体上。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 典型测点的导纳特性

在选定 0~ 2000 Hz 激振频率范围后, 3 点激励, 可以得到 56 个加速度响应信号。输入分析仪得到相应的实、虚频特性曲线, 分析比较了各导纳曲线, 最后选出 3—22 这条实频、虚频特性曲线来, 因为在所有曲线中此曲线峰值相关性较好, 相关函数曲线的相关系数均高于 0.9 故可认为这些数据是可信的。

发动机机体的震动固有频率主要为中、高频。当复合材料发动机在最高转速 5500 r/min 时, 该发动机的

燃烧噪声、排气和进气噪声及活塞噪声的基频均为 183.33 Hz, 而复合材料机体的一阶固有频率为 505.3 Hz, 两值错开, 不会引起共振。但发动机配气机构噪声基频与发动机转速有关<sup>[8]</sup>, 当转速为 940、1394、2179、2653、3404 r/min 时, 其配气机构噪声基频正好与机体的 1-5 阶固有频率相同, 这时振动明显。典型测点的导纳特性(实频特性、虚频特性和相频特性)见图 4。

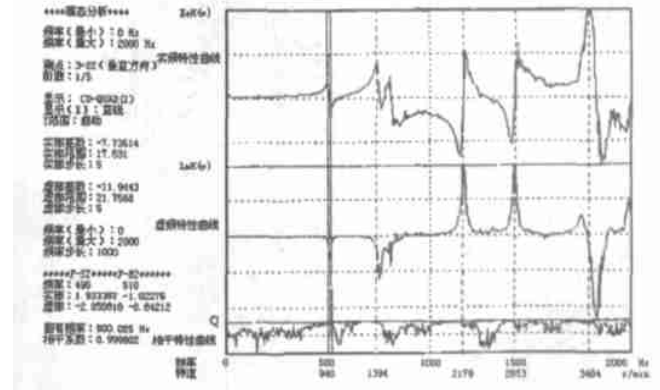


图 4 典型测点的导纳特性

Fig 4 Admittance feature of typical testing points

因 DA 462Q 复合材料发动机机体的材料特性与金属材料有区别, 如具有黏弹性等, 故有不同于金属发动机的动态性能。发动机机体在工作过程中受力复杂, 运转时受激振动, 而机体的振动对发动机的工作性能影响较大。机体材料的黏弹性有助于增加振动阻尼, 减振降噪, 但对结构的刚度及尺寸稳定性有重要的影响。

### 3.2 机体的模态参数

从导纳曲线看到, 0~ 2000 Hz 之间共有 5 个峰点, 分别对应五阶模态。对复合材料发动机机体进行振动模态分析, 得到该机振动的前 5 阶固频、振型及其它模态参数(见表 1)。由表 1 可知, 在前 5 阶模态参数中, 除第 1 阶模态质量、模态阻尼、模态刚度较大外, 从 2~ 5 阶的参数都逐渐增大, 这样对机体振动的影响将逐渐减小, 故可只考虑前 5 阶模态。在验证机体动态计算的同时, 模态参数为复合材料机体的优化结构, 可获取最佳参数, 提供数据参考。

表 1 机体的模态参数

Table 1 Modal parameters of the engine block

阶数	固有频率	模态质量	模态阻尼	模态刚度	阻尼比
1	501.091	43.7895	3715.55	4.3152E+08	0.0134737
2	743.364	3.53166	556.332	7.70663E+07	0.0168610
3	1162.16	12.2078	1805.39	6.50988E+08	0.0101259
4	1415.71	13.0798	2028.92	1.03500E+09	0.00871896
5	1815.36	17.1549	4242.48	2.23216E+09	0.0108401

与相应的金属机体相比, 试验发动机的各阶固有频率有所升高(除 1 阶以外, 金属机体前 5 阶自振频率为 623.6、655.9、778.1、1080.0 Hz)。这是因为试验机体材料的弹性模量较金属材料低, 为了使机体沿轴线方向的变形不致太大, 加大了壁厚, 因此使机体的整体刚度增加, 从而固有频率较高。

尽管复合材料机体的 1 阶固有频率与发动机的配

气机构噪声基频错开,不会引起共振。但在特定转速下,发动机配气机构噪声基频正好与机体的1~5阶固有频率相同,这时振动明显,也会引起较高的噪声。

### 3.3 振型

机体前5阶模态振型如图5所示。

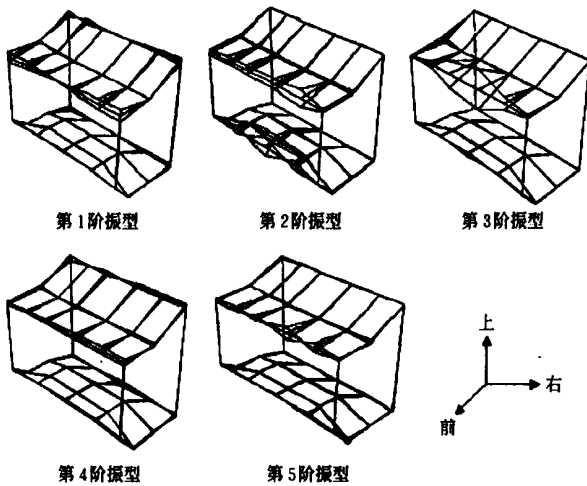


图5 机体前5阶模态振型图

Fig 5 First five modal shapes of the engine block

由图5可知,由于机体结构复杂,各阶频率所对应的振型也相当复杂。图5中所示第1阶频率所对应的振型沿长度方向机体发生扭转。第2阶频率所对应的振型沿长度方向使机体发生弯曲,相对于底面,前面上部弯曲严重。第3阶频率所对应的振型沿宽度方向使机体发生弯曲,后面和左侧面弯曲严重。第4阶频率所对应的振型使机体以沿长度方向发生弯曲为主,相对于后面中线,上部弯曲严重,下部次之;同时机体发生扭转。第5阶所对应的振型使机体处于扭转和弯曲的复杂状态。

所有振型图都表明,机体的上部振动比其下部剧烈得多。这和金属机体的振型有着明显的不同。一般金属机体的下部由于裙部的刚度较小,因而下部振动比上部剧烈,其下部的振动会传给与之相连的油底壳,引起油底壳的振动。而复合材料发动机机体的下部振动小,油

底壳的振动相应也较小。

通常发动机表面的辐射噪声主要由板式结构的横向弯曲振动发出,机体和油底壳的表面的振动是辐射噪声的主要源地。与机体底面部相连的油底壳振动的自振频率在200~400 Hz,多处中低频区,其横向振动最为重要。振动中起主导作用的是342、359、388、535、643 Hz频率成分。试验复合材料机体的固有频率和上述频率相错开,不会发生共振现象,机体材料的黏弹性使得振动迅速衰减,使得发动机表面辐射噪声减小。

## 4 结论

由试验结果可以看出,复合材料发动机机体的固有频率较金属机体高,同时因为机体复合材料属高内阻尼材料,它的黏弹性能有助于增加振动阻尼,而金属机体的内阻尼很低,因此,复合材料发动机机体具有优良的减振降噪性能。

从机体的振型可知,复合材料发动机机体的横向振动是比较严重的。表明机体在周期变化的气缸压力和惯性力及活塞的侧压力作用下,可能导致发动机零件的早期破坏,如主轴承座的裂纹、油底壳的开裂等等。需要采取措施改善横向振动特性。

机体上部刚度较差,几乎各阶模态都有较大的变形,应适当加强该部位的刚度,以减少振动位移幅值。

### [参考文献]

- [1] Brooke L. Polimotoring to production [J]. Automotive Industries, 1988, 2(152).
- [2] 张力,张恒,闻荻江. 发动机机体复合材料的疲劳性能研究[J]. 内燃机工程, 1998, 19(3): 72-77.
- [3] 张力,张恒,闻荻江. 汽车用复合材料发动机机体的研制[J]. 兵工学报, 1999, 20(2): 186-189.
- [4] 张力,张恒,闻荻江. 复合材料发动机机体的粘弹性分析[J]. 农业工程学报, 1999, 16(1): 46-49.
- [5] 张力,张恒,闻荻江. 复合材料可熔性合金型芯成形工艺及应用[J]. 中国机械工程学报, 1999, 10(4).
- [6] 杨景义,等. 试验模态分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [7] 黄世霖. 工程信号处理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [8] 王伯良. 噪声控制理论[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.

## Modal experiment and analysis of resin based composite engine block

Wen D ijiang<sup>1</sup>, Zhang L i<sup>2</sup>, Zhang H eng<sup>3</sup>

(1. School of Material and Engineering, Suzhou University, Suzhou 215021, China;

2. School of Mechanical and Automation, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China;

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Modal experiment was carried out on the composite engine block. And the first 5-stage modal parameters were obtained as well as the modal vibration shapes. Results indicate that the natural frequencies of composite engine block are higher than that of metal engine block. Composite engine block has excellent vibration damping property and noise reducing property because composite has strong internal damp and its viscoelasticity can help increase the vibration damp. The transverse vibration of composite engine block was so serious that it was necessary to take measures to improve this defect. It laid the foundation for the structure design and improvement of the composite engine block.

**Key words:** composite; engine block; modal analysis