

文章编号:1000-582X(2009)09-0987-05

## 摩托车发动机壳体噪声辐射数值分析

杨 诚<sup>1</sup>,周 科<sup>1</sup>,陈 旭<sup>1</sup>,吴行让<sup>2</sup>,王中方<sup>1</sup>,周锦佳<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院,重庆 400030; 2. 长安汽车工程研究院,重庆 400023)

**摘 要:**采用有限元/边界元法(FEM/BEM),对摩托车发动机壳体进行模态分析,将试验模态与计算模态进行对比,两者的吻合程度较高,表明所建立的有限元模型的正确性;对壳体进行频率响应分析及结构噪声辐射的仿真分析,并对发动机壳体的噪声辐射进行预测,得到其结构外部声场特性,将预测结果与试验结果在各频带下进行对比分析,其吻合程度较高,表明该方法是有用的。

**关键词:**有限元/边界元法;发动机壳体;噪声辐射;预测分析

中图分类号:TB535

文献标志码:A

## Numerical analysis of noise radiation from motorcycle engine shell

YANG Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Ke<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>, WU Xing-rang<sup>2</sup>, WANG Zhong-fang<sup>1</sup>, ZHOU Jin-jia<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chang'an Automotive Engineering Institute, Chongqing 400023, P. R. China)

**Abstract:** FEM/BEM (Finite Element Method/Boundary Element Method) mode analysis of the noise radiation from motorcycle engine shell is conducted. The natural frequency is compared between FEM/BEM analysis and experimental analysis. The FEM/BEM results are agreed with the experiment results, which proves that the finite element model is correct. The frequency response is analyzed and the structure's noise radiation is simulated by means of FEM/BEM, in order to predict the noise radiation from the motorcycle engine shell and gain the sound field characteristic outside the structure. The calculation data is compared with the experiment data in different frequency bands. The result shows high accordance, which indicates that this method is effective.

**Key words:** FEM/BEM; engine shell; noise radiation; prediction and analysis

摩托车发动机噪声除了进、排气噪声外,结构表面辐射噪声也是发动机主要噪声源之一。其中,薄壁件(正时齿轮室盖、变速箱端盖等)的辐射噪声占有较大比例<sup>[1]</sup>。随着内燃机振动噪声控制技术研究的不断深入,以及人们对车辆各方面性能要求的不断提升,传统上仅对发动机进、排气噪声加以控制的降噪方法,已经很难满足当今的要求。

目前,对发动机振动及辐射噪声的研究方法主要有以测试为主的试验研究和以计算机模拟计算为主的CAD/CAE分析研究。声强测量技术是目前

研究发动机噪声的最为广泛的声学测量技术,它于1977年提出并在20世纪80年代初得到迅速的发展<sup>[2-4]</sup>。此外,近年来随着计算机技术的发展,采用计算机虚拟试验的方法即基于有限元/边界元(FEM/BEM)分析的预测方法也随之兴起<sup>[5-7]</sup>。

笔者以某摩托车发动机右壳为例,运用FEM/BEM方法在多点激励的条件下,对发动机壳体辐射噪声进行预测<sup>[8]</sup>,并用丹麦B&K声强测试系统对壳体进行声场测量,以分析和验证仿真数据的有效性。

收稿日期:2009-04-21

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(2007AC6040)

作者简介:杨诚(1964-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事测试技术、振动噪声控制研究,(E-mail)369805679@qq.com。

## 1 发动机壳体模型的建立

笔者以某型发动机的壳体为研究对象,其结构材料为硬铝合金,在建立该壳体的有限元模型时,根据经济性原则<sup>[9]</sup>,对该壳体结构进行了简化,即:忽略了壳体上的部分铸造圆角。由于该壳体为不规则构件,某些部位带有加强筋,并且在轴承座上还有局部加厚,所以采用实体单元建模<sup>[10]</sup>。此外,为了使计算更加准确,在理论仿真计算时采用 10 节点的等参数单元 Tet 10 对该模型进行单元的划分。该壳体的 3D 几何模型及有限元模型见图 1、2。

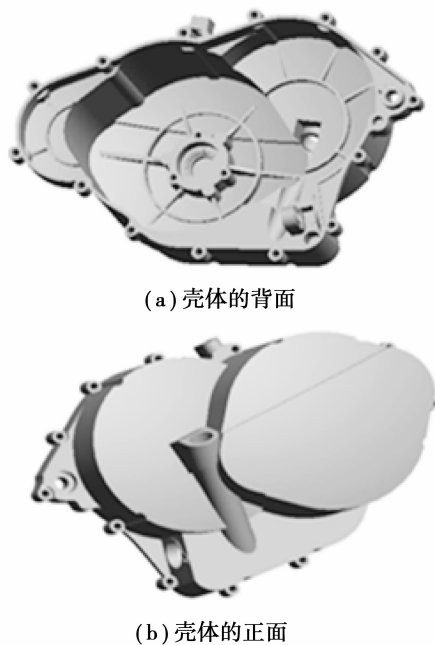


图 1 发动机壳体的 3D 几何模型

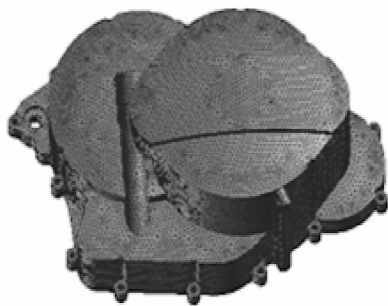


图 2 发动机壳体的有限元模型

## 2 结构模态分析

在模型及各项参数确定后,进行自由模态分析,得出结构的固有频率和振型<sup>[11]</sup>,并与试验得到的固有频率及振型对比,两者的模态结果吻合程度较高,说明了有限元模型的正确性,所建立的有限元模型

可以用来进一步分析该壳体的动态特性<sup>[12-13]</sup>。

表 1 试验模态与计算模态的对比

阶次	试验值/Hz	计算值/Hz	误差/%
1	428.6	433.70	1.19
2	759.9	788.84	3.81
3	856.1	854.08	0.24
4	1 127.2	1 151.50	2.16
5		1 365.30	
6	1 422.1	1 435.40	0.94
7	1 613.6	1 527.10	5.36
8	1 747.2	1 714.40	1.88

## 3 壳体的频率响应分析

为了预测发动机壳体在实际工况下的响应,笔者利用有限元软件 MSC. PATRAN/N-ASTRAN 2005 对该壳体进行了频率响应分析,由于壳体与机体是通过螺栓连接在一起的,故分析时采用试验得来的螺栓处的加速度信号作为其边界激励。在加载约束时,分别约束了  $z$  向的移动自由度, $x$ 、 $y$  向的转动自由度。图 3 为某一螺栓处所测得的振动加速度信号频谱图。

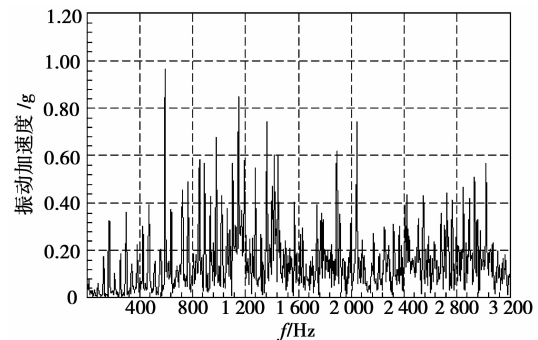
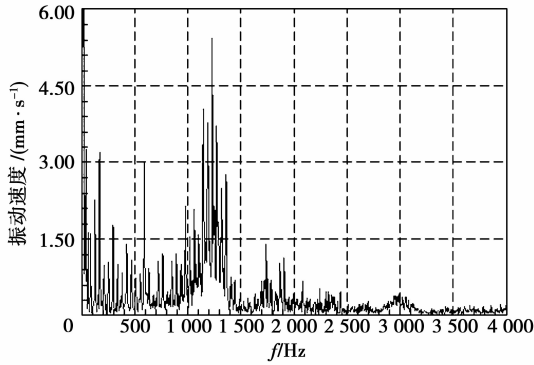


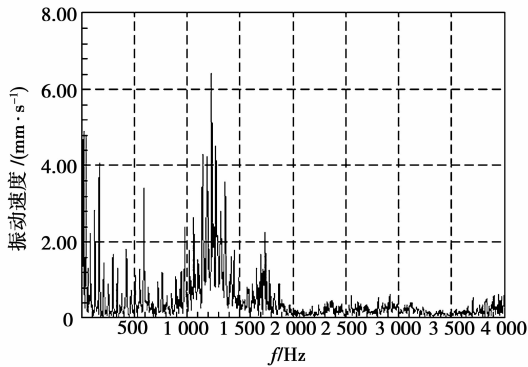
图 3 发动机壳体某一螺栓处的振动加速度信号频谱图

由于振动体表面辐射的声功率与结构振动速度的平方成正比<sup>[14]</sup>,故在分析时,提取了该结构表面振动速度的计算结果,图 4 为典型节点的振动速度频谱图。

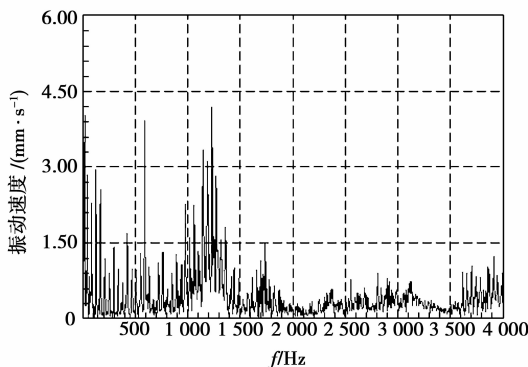
由图 4 可以看出,该壳体在外部激励下,振动速度的峰值频率主要集中在 1 200 Hz 左右;另外在 1 600 Hz 左右也出现了一个峰值群,在高频部分,其幅值衰减很快,没有明显的峰值频率。据此可初步断定,该结构噪声主要以中频噪声为主,集中在 1 000~2 000 Hz 这个频带内。



(a) 油尺口附近节点处



(b) 油尺上的节点处



(c) 平面上的节点处

图 4 典型节点的振动速度频谱图

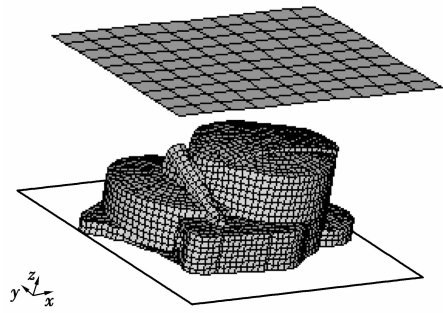
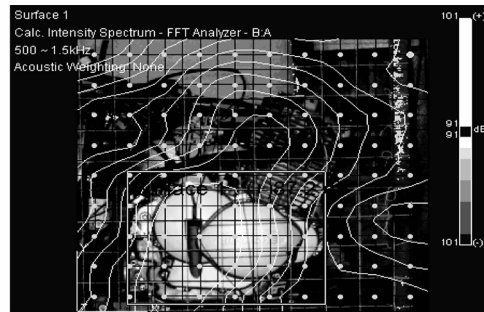
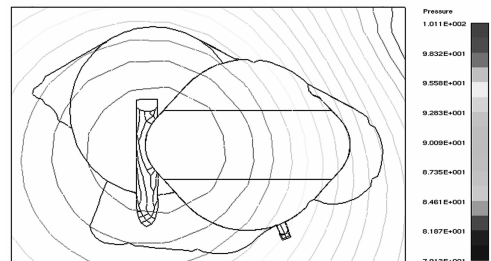


图 5 壳体结构外部声场的理论分析模型

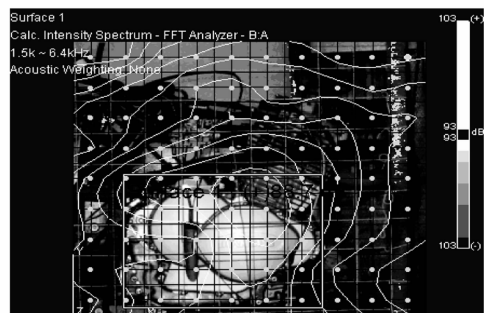
建立分析模型时,在距离壳体表面 10 cm 处建立了一个平面场点,用来计算结构在该场点处的外部声场,以得到壳体在平面场点的声压分布图。图 6 为结构在各频带下,试验所得与仿真计算的平面场点的噪声分布对比图。



(a) 500~1 500 Hz (试验)



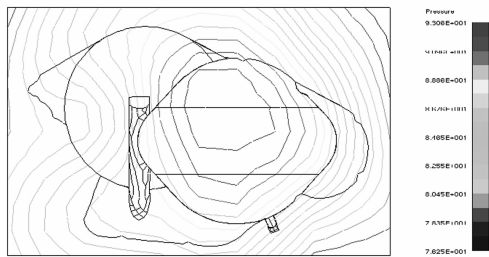
(b) 500~1 500 Hz (计算)



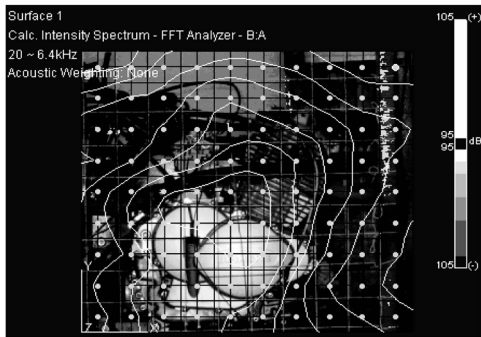
(c) 1 500~6 400 Hz (试验)

### 4 结构噪声辐射仿真

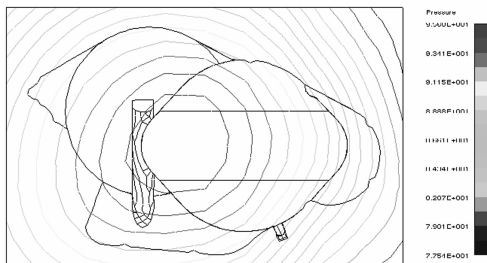
在实际工况中,发动机壳体并不是孤立存在的,其后腔的机体封闭了发动机内部的声场,并反射了壳体外部噪声,故在建立壳体外部声场的理论分析模型时,为了能更好地模拟机体对该壳体的影响,笔者在  $z=0$  处建立一个法向速度为零的刚性平面,它相当于一个无限大的障碍板,来反射发动机壳体外部声场向后的辐射噪声。此外,计算时采用直接边界元法对壳体进行声场模拟,以此获得壳体表面辐射声功率等声场特性参数<sup>[15]</sup>。图 5 为壳体结构外部声场的理论分析模型。



(d) 1 500~4 000 Hz(计算)



(e) 20~6 400 Hz(试验)



(f) 20~4 000 Hz(计算)

图 6 不同频带下试验所得与仿真计算的平面场点的噪声分布对比图

由图 6 可以看出,在 20~4 000 Hz,噪声分布情况基本相似,只是试验结果的声源中心稍稍偏上,集中在壳体与缸头交接处,这是因为在交接处壳体的密封性不好导致有噪声冒出所致;在 500~1 500 Hz,两图的声源中心均集中在两凸面的交接处,试验中因受地面反射,使其声源中心范围扩大,并向下偏移;在 1 500~4 000 Hz,两图均以右半凸面为主要辐射中心。综上所述,利用 SYSNOISE 计算所得结果与试验所测结果,两者等值线分布图基本相似,有很好的吻合度,说明此噪声预测方法正确可信。

为了进一步证实该噪声预测方法的正确性,特选取了全频带上声强最大点处的声强频谱来进行对比分析。图 7 为进行 A 计权后的仿真计算和试验的中心点声强频谱图的对比结果。

由图 7 可以看出,两频谱图总的趋势相同,二者在 1 200、2 000、3 000 Hz 左右均呈现明显的峰值

群,其中最大峰值频率均出现在 1 200 Hz 左右,吻合程度较高,已能满足工程实际要求。

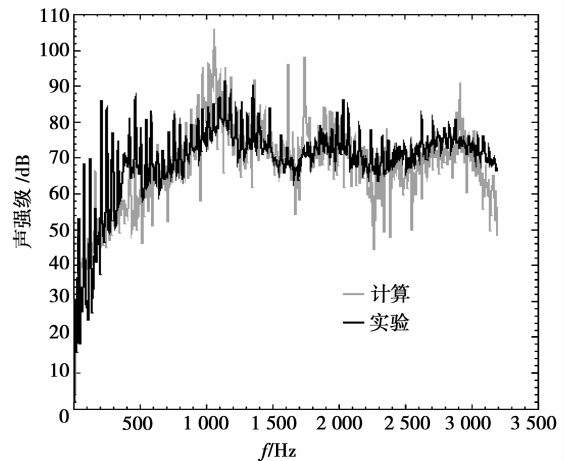


图 7 仿真计算结果和试验结果的中心点声强频谱对比图

## 5 误差分析

由上面的分析可知,理论计算结果基本反映了该壳体的振动特性和噪声特征,但与试验结果之间还是有一定的误差。归纳起来,引起误差的因素主要有以下两个方面:

1)模型误差。为了减少有限元模型的复杂程度,提高有限元单元的协调性,减少有限元计算的时间,对模型进行了一些简化,如忽略了一些圆角等的细微结构,故有限元模型与真实模型间存在着差异。

2)约束条件误差。在实际的工作中,壳体是通过螺栓安装在机体上,机体本身具有一定的弹性,而在有限元模型中,认为机体是不具有弹性的;在对壳体的约束方面,约束了  $z$  向的移动自由度, $x$ 、 $y$  向的转动自由度,故存在这约束条件的误差。

## 6 结论

通过 FEM/BEM 预测发动机壳体的动态特性及声学特性,与试验结果吻合较好;此外,发现壳体在外部激励下,振动速度的峰值频率主要集中在 1 200 Hz 左右,故在后续的声学优化方面可考虑如下 2 种方法:

1)根据壳体的第 4 阶模态(频率值为 1 151.5 Hz)的振型,进而对壳体振动最大的部位加以改进(采用加筋、增厚等措施),增加壳体的刚度,提高共振频率,降低振动幅值,达到降低辐射噪声的目的。

2)考虑在不影响装配的情况下,改变壳体的形状,如将原壳大面形状改成圆形,能够防止壳体曲率

突变,对于曲面而言,固有频率与曲率半径成反比,故采用较小曲率半径的壳体,能够提高共振频率,降低振动的幅值,达到降低辐射噪声的目的。

#### 参考文献:

- [1] 贾维新,郝志勇,杨金才. 发动机油底壳辐射噪声预测方法的研究[J]. 内燃机学报, 2005,23(3): 269-273.  
JIA WEI-XIN, HAO ZHI-YONG, YANG JIN-CAI. Research on prediction method of radiated noise of engine oil pan[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(3):269-273.
- [2] ZHANG J H, HAN B. Analysis of engine front noise using sound intensity techniques [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(1): 213-221.
- [3] WANG J H, CHANG C. Identification of the number and locations of acoustic sources[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005,284(1/2):393-420.
- [4] BRUHL S, RODER A. Acoustic noise source modelling based on microphone array measurement[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231 (3): 611-617.
- [5] ZHANG J H, HAN J. CAE process to simulate and optimise engine noise and vibration [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20 (6): 1400-1409.
- [6] 张宗波,李吉,王珍. FEM/BEM法计算空调机室外机箱结构噪声辐射[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(1): 81-84.  
ZHANG ZONG-BO, LI JI, WANG ZHEN. Structure-borne noise calculation radiation by out door cabinet of air conditioning using FEM/BEM [J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(1):81-84.
- [7] LIM T C. Automotive panel noise contribution modeling based on finite element and measured structural-acoustics spectra[J]. Applied Acoustics, 2000, 60(4):505-519.
- [8] 杨陈,郝志勇,陈馨蕊. 柴油机机体辐射噪声预测及低噪声改进设计[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2008, 29(4):301-321.  
YANG CHEN, HAO ZHI-YONG, CHEN XIN-RUI. Prediction of engine block's radiation noise and low noise design [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(4):301-321.
- [9] 张海娟. 发动机油底壳振动与噪声辐射研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.
- [10] 王文平, 项昌乐, 刘辉. 基于 FEM/BEM 变速器箱体辐射噪声的研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(5): 107-111.  
WANG WEN-PING, XIANG CHANG-LE, LIU HUI. Study on the radiation noise of gearbox housing based on FEM/BEM[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(5): 107-111.
- [11] 郭磊,郝志勇,贾维新,等. 预测与降低柴油机油底壳辐射噪声方法的研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(7): 685-695.  
GUO LEI, HAO ZHI-YONG, JIA WEI-XIN, et al. A research on prediction and radiated noise from oil of diesel engine[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(7): 685-695.
- [12] KIM N H, DONG J. Shape sensitivity analysis of sequential structural-acoustic problems using FEM and BEM[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 290(1/2): 192-208.
- [13] 金岩, 郝志勇. 内燃机机体噪声特性的数值仿真分析[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(12): 2073-2076.  
JIN YAN, HAO ZHI-YONG. Study on noise emission of engine block based on numerical simulation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(12): 2073-2076.
- [14] 许响林,李景渊. 发动机油底壳辐射噪声控制研究[J]. 客车技术与研究, 2007, 29(5):4-6.  
XU XIANG-LIN, LI JING-YUAN. Study on controlling noise radiated from engine oil pan surface[J]. The Technic Research of the Passenger Car, 2007, 29(5): 4-6.
- [15] TONG Z, ZHANG Y, ZHANG Z, et al. Dynamic behavior and sound transmission analysis of a fluid-structure coupled system using the direct-BEM/FEM[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299 (3): 645-655.

(编辑 张 芊)