

基于 SYSNOISE 的柴油机外声场模拟研究

梁兴雨, 舒歌群

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Investigation on Outer Sound Field Simulation of Diesel Engine with SYSNOISE Software

LIANG Xing-yu, SHU Ge-qun

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Principles and methods for acoustics computation of diesel engine with SYSNOISE software were introduced in this paper. Methods and steps about combination of analysis model and boundary condition to calculate acoustic characters of the diesel engine were presented. Sound field induced by structural vibration of the diesel engine was simulated. Acoustic parameters such as the whole engines radiating acoustic power, contributions of main parts to acoustic results, as well as near field and far field sound pressure level were calculated. Under assistance of these results, some information and reference could be gotten to conduct structural acoustic optimization.

摘要: 建立了基于 SYSNOISE 边界元技术的柴油机噪声预测模型, 进行了振动边界条件的导入, 采用直接边界元算法实现了快速求解噪声辐射。计算得到了声功率、近场及远场辐射声压和辐射效率等结果, 为在设计阶段进行噪声预测评价提供了基础。通过各部件声能量贡献的计算, 得到了不同部件的结构声辐射贡献, 为优化方法提供具体的改变策略。

关键词: 内燃机; 柴油机; 声辐射; 预测; 边界元

Key words: IC engine; diesel engine; sound radiation; simulation; boundary element

中图分类号: TK421.6

文献标识码: A

0 概述

内燃机噪声控制的实践表明, 改善现有内燃机振动声学特性的可能性是有限的。对于大量生产的内燃机采用改变结构或屏蔽等措施, 在经济上往往不合算^[1,2]。因此, 更合理的办法是在设计阶段就考虑内燃机振动声学指标的要求。

对于高频噪声的预测工作, 一般采用统计能量分析的方法。对于低频振动, 由于计算工作简单, 结果可靠, 大多数采用有限元和边界元相结合的方法

进行预测。有限元振动声学分析和边界元声学计算软件 SYSNOISE 具有振动及声学预测功能, 既含有有限元技术又含有边界元技术, 可用于处理一般复杂弹性结构的耦合振动声学问题。该软件利用边界元法解决声学问题非常全面, 略优于其它软件^[3]。然而该软件中没有有限元和边界元网格生成前处理功能, 要借助其它有限元前处理软件来生成, 用于计算声学辐射的结构振动可以是实际测得的速度响应数据, 或者是由有限元或其它方法计算得到的速度响应数据。MSC/NASTRAN 与 ANSYS 软件以有

收稿日期: 2007-05-16

基金项目: 云南省院省校合作基金资助课题(2003 HBBAA02A049); 中国博士后科学基金资助课题(20060400193)

作者简介: 梁兴雨(1977-), 男, 博士, 主要研究方向为内燃机振动噪声控制, E-mail: lxy@tju.edu.cn。

限元技术为主,其网格前处理、结构振动分析功能十分强大,非常成熟。因此,可以采用有限元与边界元接力分析的方法,将两套软件交替使用,利用它们各自的优点解决振动声学耦合问题。有限元动力响应计算采用 MSC/ NASTRAN 软件,整个声学计算以 SYSNOISE 软件为中心。

采用 SYSNOISE 和 NASTRAN 进行声学预测研究的流程如图 1 所示。

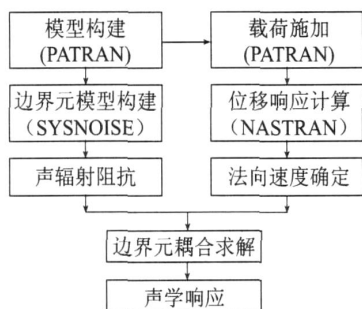


图 1 SYSNOISE 和 NASTRAN 联合预测流程

首先,使用 MSC/ NASTRAN 软件计算结构振动频响特性,得到有限元模型上各节点处的响应(包括位移、速度和加速度)。然后,将所得到的动力响应提取出来,作为 SYSNOISE 软件中声学边界元分析模型的输入边界激励条件加入,利用 SYSNOISE 软件进行声学计算分析,这样就利用了 SYSNOISE 软件强大的声学后处理功能^[4]。

SYSNOISE 软件中声学边界元有直接边界元和间接边界元两种方法。本文采用直接边界元计算声场的辐射,对柴油机结构的声辐射情况进行了模拟,为柴油机针对减振降噪的结构声学优化提供参考。

1 模型的建立

采用有限元进行模态分析和动力响应计算是噪声辐射分析的前提和基础。由于在有限元计算过程中采用的是实体单元网格划分技术,而边界元不能采用实体单元,而且在边界元的噪声辐射计算中,网格大小是由分析频率的上限频率决定的,一般情况下,所选单元特征尺寸小于由最高关心频率所决定的声波波长的 $1/4$ 时,声学量结果的计算精度即可满足要求。这就需要对原有实体模型进行重新划分,同时对整机结构外声场计算结果影响较小的局部特征,如部分附件安装凸台、轴孔、螺栓孔以及倒圆、润滑油道(孔)等进行进一步简化,但对于声辐射影响较大的肋板,凸台等都未作简化。

一般说来,结构模型和声学模型应该基于相同零件创建,但网格划分大小可以不同。声学模型是用来描述不同流体域特性及其之间界限的表面网格模型。一个定义完整的声学模型应包含预求解问题的所有声学信息,如结构表面的声学特性、由声学流体表面界定的声学流体的物理特性、声载荷及在声学流体中定义的用于测量声学结果的域点等。综合考虑计算可以达到的精度、建模的复杂程度以及求解成功的可能性,本文选用三角形单元实现边界元网格模型的离散。单元的细化程度由结构总体尺寸、声学流体域中最短声波波长和预计算得到的最高频率数值决定。根据上述原则,并结合对发动机简化声学模型的声场分析收敛性的要求,最终确定声边界元网格所取的单元长度为 30 mm ,以保证所要分析的模型频率精度控制在 1500 Hz 以下^[5]。

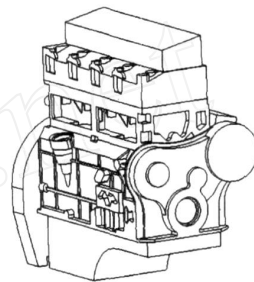


图 2 边界元实体模型

如图 2 所示为整机实体模型,图 3 所示为边界元模型。边界元模型共有节点 4916 个,单元 9823 个。边界元模型能够满足高频计算的要求。

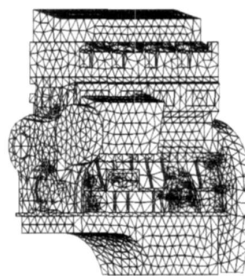


图 3 噪声预测采用的声学边界元模型

2 施加的主要边界条件

作用在机体上的各种作用力产生的激励位移响应通过在 PATRAN 中计算得到,施加的激励主要有:主轴承座上的作用力,不平衡惯性力,活塞侧击力,缸盖所受缸内爆发压力等。将上述位移边界条件通过 SYSNOISE 预设的与有限元软件间的接口导入边界元计算模型中。但 SYSNOISE 能够识

别的数据格式与有限元计算结果间存在一定的差别,通过自编的格式转换程序可以直接将响应计算结果转换为SYSNOISE能够识别的数据文件。根据有限元和边界元网格间的关系,SYSNOISE自动探测耦合表面,并实施正确的模型边界条件传递和分析,从而有限元计算后就可以实现边界条件的施加。

图4是速度边界条件导入后,在100 Hz处的表面振动速度分布图。从图4中可以看出,振动速度分布不均匀,整机振动受活塞侧推力和主轴承力的影响发生左右两侧的摆动比较明显,所以在机体左右两侧振动比较强烈,而齿轮室罩处由于没有考虑齿轮啮合的噪声激励,所以振动不是很大。

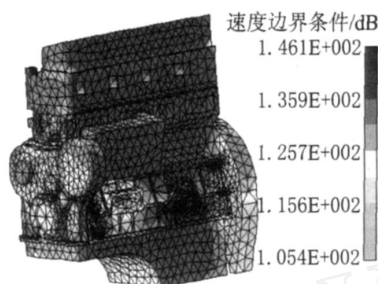


图4 100 Hz处表面振动速度分布图

对于影响振动辐射噪声的声辐射阻抗,主要通过测量所得到的声辐射阻抗决定,只要输入相应的阻抗辐射系数^[6],那么对于确定的发动机本身在一定条件下的声学特性就是确定的。从而对于上述声学边界元模型具有了确定的辐射特性和结果,通过求解方程就可以实现声辐射的计算。

3 计算结果

计算得到的整机近、远场声学结果主要有:柴油机表面各点声压,近场辐射声压(级),远场辐射声压(级),外场声强,整机辐射声功率以及部件对辐射声功率和远场声压级的贡献等^[7]。这些声学结果可实现宏观上对内燃机结构声辐射特性的全面预估与评价,并可从微观角度给出以降低结构声辐射量级为目的的结构修改的详细参考信息。

3.1 声压结果

图5是柴油机表面辐射的声压分布情况。从图5中可以看出,在同等振动速度分布情况下,比较平的表面,声压就会比较大,而表面的形貌越复杂,声压相应就越小。其分布状况大体上也与振动速度分布相当。

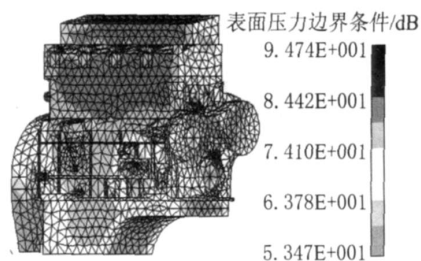


图5 100 Hz表面声压分布状况

图6是发动机远场辐射声压(1 m远处)表面声场分布图。

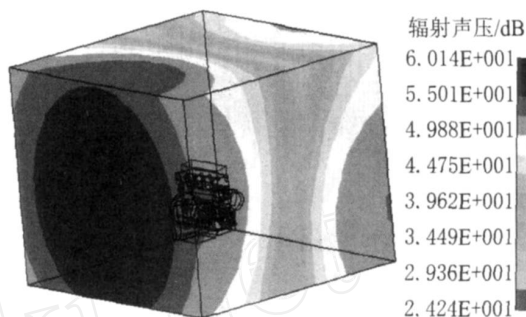


图6 发动机远场辐射声压(1 m远处)

图7是柴油机在100 Hz处远场声强分布图。从图中可以看出,发动机左右两侧面及底面声强比较大,而发动机前端及顶面噪声并不是很大,这主要与所施加的激励有关。

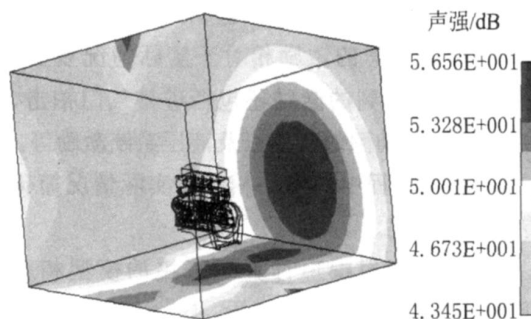


图7 100 Hz处远场声强分布图

取远场噪声辐射的左右两侧的测量点的声压级与频率的关系图,同时为验证计算结果的准确性,对实际测量的发动机两侧的噪声进行频谱分析,如图8所示为发动机左侧分析对比图,图9为发动机右侧分析对比图。

从图8,图9中可以看出,计算所得噪声在一定程度上反映了发动机工作特性,在发动机工作转速的主要谱次对应着比较大的噪声,同时随着频率增加,整体情况变化趋势一致,但计算所得频谱曲线相

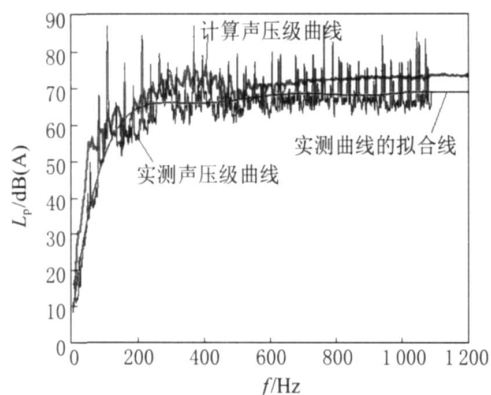


图 8 左侧噪声频谱图对比

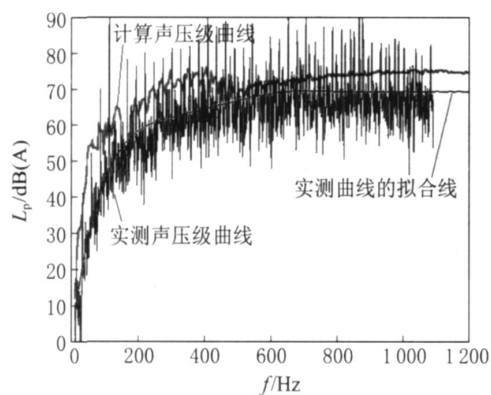


图 9 右侧噪声频谱图对比

对比较平缓,没有比较大的变化。对比实际测量所得的噪声可以看出,整个频率段实际测量的声压级要比计算高,特别是在各主要谐波上,测量值要高出 10 dB(A),分析其中原因大致包括如下几条:

(1) 计算考虑的激励相对于实际情况要少,实际上发动机所受到的激励还包括进排气门拍击,齿轮传动激励,运动副的摩擦以及液压系统激励等。

(2) 计算过程中的模型相对于实际情况简化导致传递发生变化。

(3) 表面辐射噪声计算所采用的模型相对粗糙,网格划分较大。

(4) 声辐射阻抗设置与实际情况不符,导致辐射发生变化。

3.2 近场辐射结果

图 10 是计算所得发动机右侧近场噪声 2000 Hz 辐射图,实际测量的 2000 Hz 频率段右侧的噪声分布情况对应示于图 11 中。

从图中可以看出,噪声分布大体上是一致的,几个主要噪声辐射部位分别位于油底壳,发动机机体前端下部以及缸盖后部。

其它频段噪声分布与此相似,与实测结果间虽有一定差别,但大体上能够反映出近场噪声分布情况。

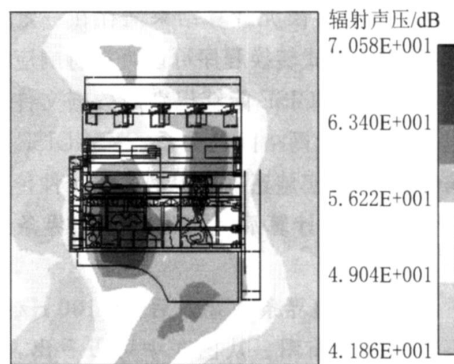


图 10 计算右侧近场噪声(2000 Hz)

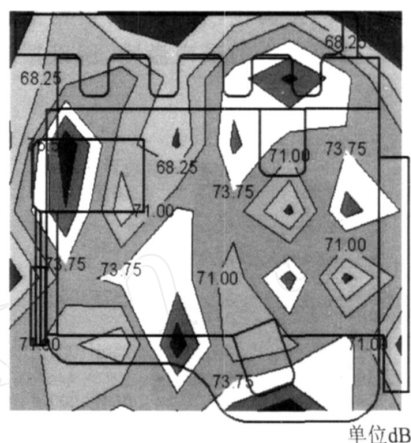


图 11 实测右侧近场噪声(2000 Hz)

3.3 主要部件声能量贡献

发动机向外辐射噪声是由其表面各部件实现的,各个部件对辐射噪声的总体贡献情况是不同的,通过计算可以得到各主要部件噪声声功率贡献比较,从而为噪声控制提供技术支持^[8]。

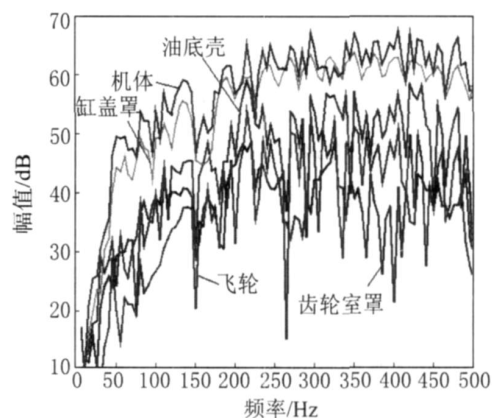


图 12 主要部件噪声声功率频谱比较图

图 12 是发动机主要部件噪声声功率频谱比较图。从图中可以看出,噪声能量相对比较大的是机体和缸盖罩,这两部分噪声能量占总能的 80%,其它

几个部件的声能量相对较弱,这是因为机体辐射面积大,振动强烈,表面没有其它遮挡物所导致的,而在图中还可以看出,噪声能量在不同频率段的具有不同的贡献大小,齿轮室罩低频和高频所辐射的噪声并不是很强烈,但在中频范围却辐射出很强的噪声。

4 结论

(1) 建立了基于边界元技术的噪声预测模型,考虑有限元技术进行振动边界条件的导入,采用直接边界元算法可以实现快速求解噪声辐射。

(2) 计算得到了声功率、近场及远场辐射声压和辐射效率等结果,为在设计阶段进行噪声预测评价提供了基础。通过各部件声能量贡献的计算,得到了不同部件的结构声辐射贡献,为优化方法提供具体的改变策略。

参考文献:

- [1] Affenzeller. 柴油机结构噪声的预测技术[J]. 柴油机设计与制造,1990(3):73-79.
Affenzeller. Structure noise prediction of diesel engine[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 1990(3): 73-79.
- [2] 冯慧华,左正兴,廖日东,等. 基于BEM/ FEM耦合技术的柴油机外声场模拟技术研究[J]. 内燃机学报,2004,22(2):155-161.
Feng H H, Zuo Z X, Liao R D, et al. Outer sound field simulation of a diesel engine based on coupled BEM/ FEM method [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(2): 155-161.
- [3] 杨德庆,郑靖明,王德禹,等. 基于SYSNOISE软件的船舶振动声学数值计算[J]. 中国造船,2002,43(4):32-37.
Yang D Q, Zheng J M, Wang D Y, et al, Numerical analysis of vibro-acoustic characters of ship with SYSNOISE software[J]. Shipbuilding of China, 2002, 43(4): 32-37.
- [4] 彭旭,骆东平. 船舶结构建模及水下振动和辐射噪声预报[J]. 振动与噪声控制,2003,23(6):9-12.
Peng X, Luo D P. The modeling of the ship and numerical simulation of coupled vibro-acoustic behavior by FEM/ BEM[J]. Noise and Vibration Control, 2003, 23(6): 9-12.
- [5] 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 W X, Hao Z Y, Yang J C. Research on prediction method of radiated noise of engine oil pan [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(3): 269-273.
- [6] 梁兴雨,舒歌群,韩睿,等. 内燃机部件声辐射效率研究[J]. 天津大学学报,2007,40(2):163-167.
Liang X Y, Shu G Q, Han R, et al, Sound radiation efficiency research of engine parts [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 163-167.
- [7] 梁兴雨. 内燃机振动噪声控制技术及其声辐射预测研究[D]. 天津:天津大学,2006.
Liang X Y. Research on noise control and prediction of sound radiation for IC engines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [8] Zhang J H, Han J. CAE process to simulate and optimise engine noise and vibration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20:1400-1409.

(编辑:孔毅)