

拓扑优化技术在降低正时齿轮罩辐射噪声中的应用^{*}

方华 王天灵 李盛成

(吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 应用 Altair Hyperworks 的 OptiStruct 优化模块, 采用拓扑优化技术, 对某柴油机正时齿轮罩进行了优化, 得到了最佳的质量分布, 据此进行了结构改进, 使该正时齿轮罩的模式振型避开正时轮系啮合激励频段, 进而降低辐射噪声。通过有限元法和边界元法联合求解得知新正时齿轮罩辐射声功率降低了 2.4 dB, 对比实验验证了计算结果。

关键词: 正时齿轮罩 噪声 拓扑优化 啮合频率 模态分析

中图分类号: TK411⁺.6 **文献标识码:** A

Design of Low Noise for Timing Gear Cover Based on Topology Optimization

Fang Hua Wang Tianling Li Shengcheng

(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The optimization of timing gear cover was carried by using Altair Hyperworks, to gain the optimal mass distribution. Hereby, the structural modification was performed. The mode of timing gear cover avoided the frequency range of timing gear train excitation, to reduce the radiated noise. In order to calculate radiated sound power of timing gear cover, the finite element method (FEM) and boundary element method (BEM) were used. The calculating result shows that the radiated sound power on new timing gear cover decrease by 2.4 dB, which was validated by the verification test.

Key words Timing gear cover, Noise, Topology optimization, Engaging frequency, Modal analysis

引言

汽车噪声法规的日益严格, 促进了发动机降噪技术的深入研究和应用。发动机零部件中, 正时齿轮罩盖具有壁薄和表面平而大的特点, 往往是主要的表面噪声辐射源, 占发动机整体噪声的比例较大, 通常发动机前端的噪声要比其他表面的噪声高 2~4 dB^[1~2]。本文采用现代测试方法、有限元法和优化设计^[3~4]手段, 对某柴油机的正时齿轮罩进行降低辐射噪声的结构优化设计。

1 噪声源定位

在对某柴油机进行噪声评价时发现, 该柴油机前端面 1 m 声压级远高于其他表面, 同时在工作转

速内阶次分析表明, 在 2 000 Hz 中心频率处(1/3 倍频程)存在共振, 因此, 在标定工况下(2 300 r/min)对前端进行了声强测试。由图 1 可知, 中心频率为 2 000 Hz 频段对噪声的贡献最大, 这与整机噪声的声压级测试相吻合, 且噪声较大的区域位于正时齿轮罩的压气机齿轮附近, 如图 2a 中的圆圈区域所示。而此时正时齿轮系啮合频率为 $1\,813 \pm 53$ Hz, 恰好与 2 000 Hz 的辐射噪声相对应。为此, 应使罩盖的固有模态避开这些频段, 尽可能减少透射噪声以及共振的可能性。

2 正时齿轮罩有限元建模及模态分析

正时齿轮罩的三维实体模型及有限元模型如图 2 所示, 有限元网格采用六面体网格划分, 单元类

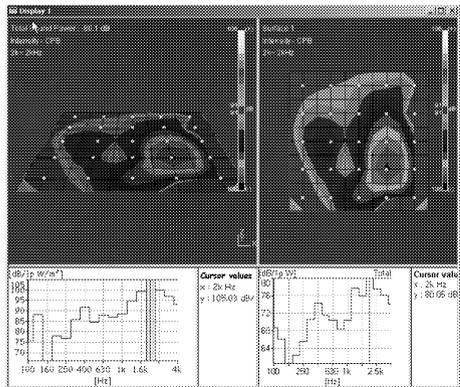


图 1 正时齿轮罩声强分布图

Fig. 1 Distribution map of sound intensity for timing gear cover

型为 solid45, 共有节点 74 278 个, 单元 56 145 个。材料参数取自材料分析结果, 弹性模量 61 GPa, 泊松比 0.3, 密度 2.68 g/cm³。

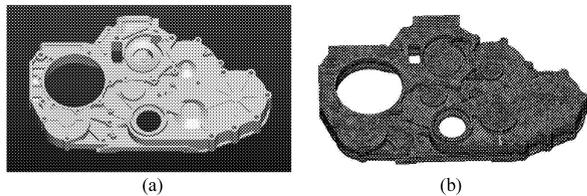


图 2 正时齿轮罩盖模型

Fig. 2 Model of timing gear cover
(a) 实体模型 (b) 有限元模型

基于此模型进行有限元自由模态分析, 并与采用 LMS TEST.lab 模态测试的结果进行对比, 各阶固有振型误差小于 6% (图表略), 验证了有限元模型的正确性。

因齿罩为薄壁铸铝部件, 相比之下, 机体刚性很大。为此, 对约束正时齿轮罩与机体的结合面及螺栓孔, 进行工作状态下的约束模态分析, 计算模型及结果如图 3 所示。由图 3 可知, 原型在 1 800~2 000 Hz 的模态有三阶, 且位置与声强测试的结果

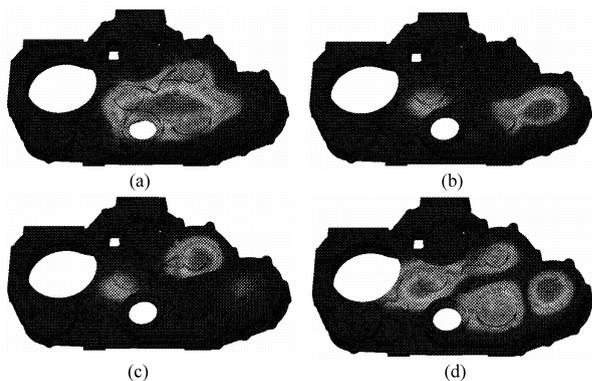


图 3 原型的约束模态分析结果

Fig. 3 Results of restricted modal analysis on the original
(a) 第 1 阶振型 1 271 Hz (b) 第 2 阶振型 1 848 Hz
(c) 第 3 阶振型 2 041 Hz (d) 第 4 阶振型 2 165 Hz

相吻合。为此要进行结构优化, 减少或消除该频率范围内的模态。

3 拓扑优化分析及优化结构确定

基于以上分析, 同时考虑实际的安装等因素, 建立了罩盖的优化分析模型, 如图 4a 所示, 优化区域如图 4b 所示。

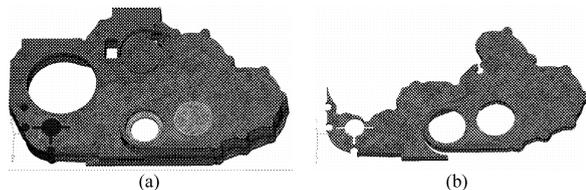


图 4 优化分析模型

Fig. 4 Optimization analysis model
(a) 模型 (b) 优化区域

设置设计变量为优化区域; 响应为前两阶固有频率及体积比; 目标函数为体积比最小; 约束条件为第 1、2 阶模态固有频率。利用 OptiStruct 优化模块, 采用拓扑优化技术进行了分析, 得到如图 5 所示的优化结果。

根据优化区域拓扑图, 结合零件的加工及装配约束, 对原始模型进行结构修改, 得到正时齿轮罩的最终优化模型, 如图 6 所示。优化模型共有节点 75 764 个, 单元 57 670 个。进行约束模态分析, 结果表明, 优化模型位于 1 800~2 000 Hz 的固有模态已消除, 2 000 Hz 以上的模态频率值提高了 300 Hz, 基本避开了中心频率为 2 000 Hz 的共振频段。

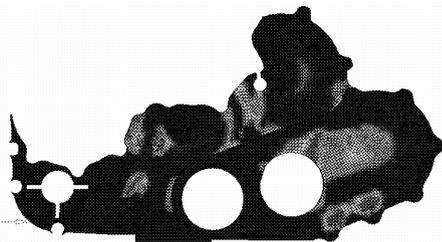


图 5 优化区域拓扑图

Fig. 5 Topology map of optimization area

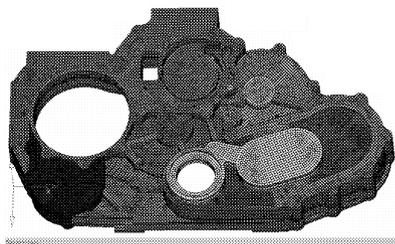


图 6 优化后模型

Fig. 6 Optimized FEM model

利用原型和优化后的有限元模型, 在螺栓处添加单位激励, 进行响应分析, 得到各节点的位移响应, 此结果作为图 7 所示边界元模型的输入边界, 进

行辐射声场分析。图8是模型的输出声功率频谱,在1500~2200 Hz范围内,优化模型输出声功率明显降低,并且2500 Hz附近峰值也比原型2000 Hz附近的峰值低约3 dB,总输出声功率降低了2.4 dB。理论分析结果表明优化模型达到了预期结果。为此,按照优化模型进行了修改设计,得到如图9所示的新正时齿轮罩。

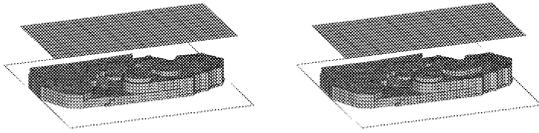


图7 边界元模型

Fig. 7 BEM model

(a) 原型 (b) 优化结构

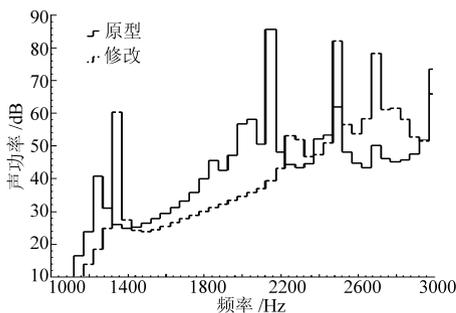


图8 优化前后输出声功率频谱

Fig. 8 Sound power spectrum of original and optimization

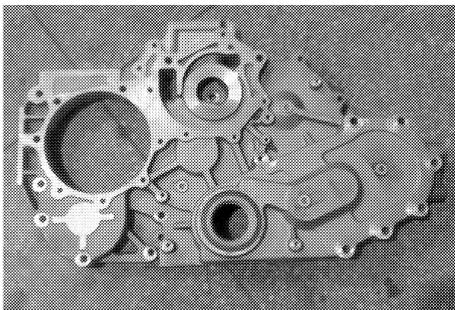


图9 新正时齿轮罩实物图片

Fig. 9 Photo of new gear cover

4 柴油机整机噪声对比实验

噪声测试在半消声室中进行,测试工况为标定工况3200 r/min和1800~3200 r/min加速工况。比较结果如图10、11所示。

图10为标定工况下前端1 m声压级频谱,由图

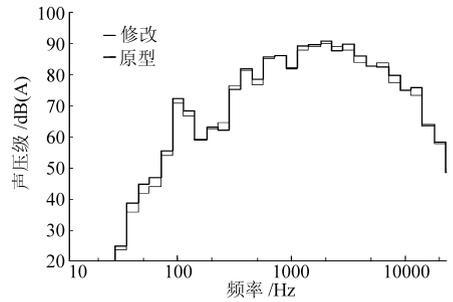


图10 3200 r/min 标定工况前端1 m声压级频谱对比

Fig. 10 Comparison of 1 m-SPL spectrum for the front of engine under rating condition (3200 r/min)

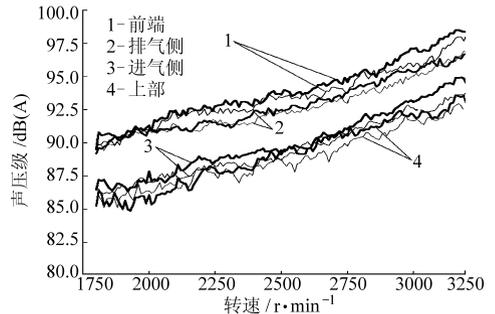


图11 加速工况4点1 m噪声对比

Fig. 11 Comparison of 1m-SPL spectrum for 4-point of engine in accelerating condition (3200 r/min)

可知,新正时齿轮罩在1250~4000 Hz频段内噪声均有所降低。

图11中曲线按测试部位共分4组,每组一对曲线,其中粗实线为原机,细实线为更换新正时齿轮罩后的结果,由图11可知,新正时齿轮罩4点1 m声压级在工作转速内噪声均有所降低,降幅在0.5~1.7 dB。

5 结束语

利用Hyperworks软件的建模及优化功能模块,对正时齿轮罩盖进行优化,可以达到很好的效果。优化后的正时齿轮罩盖模态分析表明,结构的模态固有频率已经远离了齿频激振频段,且辐射声功率计算值降低了2.4 dB,并得到了实验验证,因此优化设计达到了预期的效果。研究过程体现了低噪声结构零部件的开发流程,包括实验分析研究、模拟仿真分析、结构优化设计等。对零部件的声学优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动——理论与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006.
- 2 Laurent Moulin. Simulation study of the internal mechanical excitations to reduce the noise emitted by a heavy duty engine [C]. SAE Paper 2003-01-1727, 2003.
- 3 周传月, 腾万秀, 张俊堂. 工程有限元与优化分析应用实例教程[M]. 北京:科学出版社, 2005.

椅 SIP 点左侧的 520 mm 和 400 mm 处,根据表 1 中的优先序,应将主离合操纵杆调换到距座椅 SIP 点更近的位置,即更优的作业范围;复脱器转速表、轴流滚筒转速表、割茬高度布置在驾驶室顶最前方,为次要视区,其他仪表均布置在方向盘下面的仪表盘,为最优视区和一般视区,根据表 1 中的优先序,割茬高度的权重较高,应布置在仪表盘上,里程表则可以布置在次要视区;割台灯开关、卸粮灯开关、轴流滚筒转速开关布置在驾驶室顶最前方,为次要操作范

围,与表 1 中的优先序相符。

4 结束语

以自走式谷物联合收获机为调研对象,分析了驾驶室人机界面的元件构成,从人机工程学角度将各元件进行合理划分,在 47 份有效调查问卷基础上统计整理,通过改进的 TOPSIS 法得出各元件的权重值和优先序,用于联合收获机驾驶室人机界面设计与评价。

参 考 文 献

- 1 毛恩荣,张红,宋正河. 车辆人机工程学[M]. 2 版. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- 2 王国华,梁 ■. 决策理论与方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- 3 郭玉明,冯飞燕,韩永英,等. 农业机械化项目绩效评价指标体系与模糊评价[J]. 农业机械学报,2007,38(3):82~85.
Guo Yuming, Feng Feiyan, Han Yongying, et al. Performance evaluation system and fuzzy evaluation for agricultural mechanization project[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 82~85. (in Chinese)
- 4 朱文学,连政国,张玉先,等. 谷物干燥性能指标权重的研究[J]. 农业机械学报,2000,31(1):72~75.
Zhu Wenxue, Lian Zhengguo, Zhang Yuxian, et al. Study on weighted factors of characteristic index of drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1):72~75. (in Chinese)
- 5 Olson D L. Comparison of weights in TOPSIS models[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2004, 40(7~8): 721~727.
- 6 Deng H, Yeh C H, Willis R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights[J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(10): 963~973.
- 7 茅力可,陈荣达. 应用改进的理想解法评估竞争企业经济效益[J]. 工业工程与管理,2006,11(1):46~48,52.
Mao Like, Chen Rongda. Evaluation of economic benefits of minor enterprise based on the improved technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Industrial Engineering and Management, 2006, 11(1): 46~48, 52. (in Chinese)
- 8 卫贵武. 一种区间直觉模糊数多属性决策的 TOPSIS 方法[J]. 统计与决策,2008(1):149~150.
- 9 金晓萍,仇莹,毛恩荣,等. 车辆人机界面布局优化推理系统研究[J]. 农业机械学报,2008,39(4):183~186.

(上接第 50 页)

- 4 张胜兰,郑冬黎,郝琪,等. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- 5 方华,王天灵,李盛成. 基于有限元和边界元法的油底壳低噪声结构设计[J]. 农业机械学报,2008,39(6):17~20.
Fang Hua, Wang Tianling, Li Shengcheng. Design on low noise structure of oil pan based on FEM and BEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):17~20. (in Chinese)
- 6 龙凯,左正兴. 基于拓扑优化和形状优化方法的主轴承盖结构设计[J]. 农业机械学报,2008,39(4):152~156.
Long Kai, Zuo Zhengxing. Structural design of main bearing cap based on topological optimization and shape optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(4):152~156. (in Chinese)
- 7 周向阳,陈立平,黄正东. 连续体结构与支撑综合拓扑优化设计方法[J]. 农业机械学报,2008,39(4):128~131,68.
Zhou Xiangyang, Chen Liping, Huang Zhengdong. Topology optimization design of structure and supports for continuum-type structures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(4):128~131,68. (in Chinese)