

空调室外机系统的实验模态分析与模型更新

王栢村¹, 张博钧¹, 陈冠鋤¹, 梁秀玮²

(1. 屏东科技大学机械工程系, 台湾屏东 91201; 2. 瑞智精密股份有限公司, 台湾桃园 32849)

摘要: 有限元(Finite Element, FE)模型的正确性和可靠性对于确保结构仿真达到其分析目的相当重要。文章介绍了空调室外机(Outdoor Unit of Conditioner, OUC)有限元模型的建模技术与模型更新。建构 OUC 的有限元模型必须呈现结构的物理特性, 包括几何形状、材料性质、接触接口和边界条件等, 并施以实验进行验证。一般的方法是对结构进行实验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)以获得结构模态参数。同时, 也可由有限元模型的数值分析求得理论模态参数。模型更新是调整有限元模型参数, 使分析模型和实际结构的结构模态特性相符。结果显示, 更新后的有限元模型在结构模态和频率域特性上, 能充分呈现空调室外机实际结构的振动特性。

关键词: 空调室外机; 实验模态分析; 有限元分析; 模型更新

中图分类号: TB657.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0433-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.013

Experimental modal analysis and model updating on outdoor unit of conditioner

WANG Bor-tsuen¹, ZHANG Bo-jun¹, CHEN Guan-zhou¹, LIANG Hsiu-wei²

(1. Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 91201, Taiwan, China;

2. Rechi Precision Co., LTD, Taoyuan 32849, Taiwan, China)

Abstract: The correctness and reliability of finite element (FE) model is crucial to ensure structural simulation to fulfill its purpose. This work introduces the FE modeling techniques and model updating for outdoor unit of conditioner (OUC). The FE model of OUC must reveal the reality of structure, including geometry, material, interface and boundary conditions, and to be validated by experiments. The general approach is to perform experimental modal analysis (EMA) on the real structure and obtain structural modal parameters. At the meantime, the structural modal parameters can be numerically obtained from FE model. Model updating is to adjust the FE model such that both FE model and real structure are equivalent based on the agreement of structural modal characteristics. Results show the updated FE model of OUC can reveal good agreement with real structure in modal and frequency domain properties.

Key words: outdoor unit of conditioner(OUC); experimental modal analysis(EMA); finite element analysis; model updating

0 引言

空调室外机(Outdoor Unit of Conditioner, OUC)即分离式冷气机的室外机体, 其振动噪声往往通过底盘、梁架、管路、墙面传递至室内, 影响到自己或邻居, 引起身心的不舒适, 因此在开发低振动噪声室外机的过程中, 需要通过计算机辅助工程分析并结合模型验证程序, 探讨实际室外机结构的振动模态特性, 且有助于 OUC 的振动噪声诊断; 虽然电脑辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)为功能强大的应用工具, 但仍然需要实验的验证与

认证。本文为对 OUC 之分析模型进行模型验证以确认分析模型的可靠度, 透过分析模型观察空调室外机内部结构的振动特性, 找出压缩机产生异响的可能零件, 以辅助空调室外机的噪声诊断。

王栢村等^[1]运用理论模态分析与实验模态分析, 对空调室外机系统进行理论与实验测量分析, 结合模型验证的程序, 比对模态分析所获得的模态参数, 确认空调室外机分析模型与实际结构之间的等效性, 最终获得等效于实际结构的空调室外机分析模型, 借此探讨室外机内部各次系统的振动模态特性, 有助于对空调室外机系统的振动噪声进行诊断。丘晓宏等^[2]对除湿机底盘进行理论模态分析, 以除湿机压缩机的倍频与底盘的前三个模态作为除湿机底盘共振频率与底盘强度的参考, 最后以调整加强条、工字筋、凹槽结构几何特征方式改善底盘的强度与固有频率, 借此消除压缩机与底盘共振

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2019-02-11

基金项目: 瑞智精密股份有限公司产学合作案(10511193)

作者简介: 王栢村(1960—), 男, 台湾屏东人, 博士, 研究方向为结构振动。

通讯作者: 王栢村, E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

产生的噪声问题。SILVEIRA 等^[3]对往复式压缩机进行振动与噪声测量,并量化和确定噪声的发生源,同时也对振动传递到系统的方式进行探讨,准确地描述所有的噪声问题,最后通过新开发的组合件来变更现有的产品,达到静音的效果。PARK 等^[4]通过特征值的拓扑优化设计来降低压缩机产生的噪声,主要以工程结构噪声改善的实际案例为例,由实验模态分析与噪声测量得知,模态振型与高噪声有明显的关联性,因此通过有限元分析之特征值的拓扑优化设计来改善结构的噪声。KIM 等^[5]通过表面振动以及声音强度的测量,确认压缩机的异响传递方式,将压缩机本体进行次组合的模型验证程序。第1层次进行泵组合件的验证,第2层次对转子成品与泵的组合进行验证,第3层次加入本体外壳进行验证,第4层次则是加上本体外壳的零组件,最后进行整机压缩机的模型验证,共分为5个案例。为了降低压缩机整体的噪声量,进行模型的修整,于过滤瓶新增 L 型支架以固定内管结构,并在过滤瓶的本体加上橡胶垫圈,整体模型的修改使得压缩机的噪声频谱下降了 20 dB。MAGLIE 等^[6]介绍了工具机从精密复杂的有限元模型到简化表示的过程,在计算时间和资源方面的效率均有显著提升,并应用自动化求解,通过不同的分析验证,获得工具机的简化有限元模型。

本文运用有限元分析与实验模态分析,对 OUC 进行分析模型更新,主要目标如下所示:

(1) 对 OUC 系统与次系统的分析模型进行更新,以 OUC 内部的冷凝器与回转式压缩机为更新对象,同时以实验模态分析进行验证;确认理论与实际结构之间的等效性。

(2) 将更新完成的冷凝器与回转式压缩机分析模型加入 OUC 分析模型,再次进行模型的验证,确认结构的物理特性,包括几何形状、材料性质、接触接口和边界条件等。以零件、次系统、整机系统逐步验证的方式,更新 OUC 的有限元模型,最终获得等效于实际结构的空调室外机分析模型。

(3) 未来可借由分析模型探讨 OUC 内部各次系统的振动模态特性,有助于空调室外机系统的振动噪声诊断。

1 空调室外机的实验模态分析

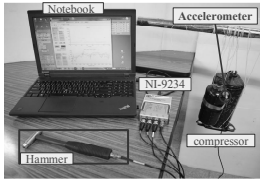
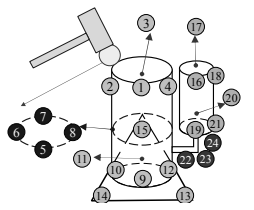
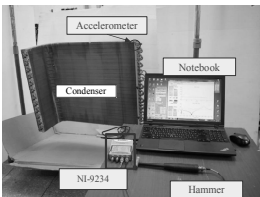
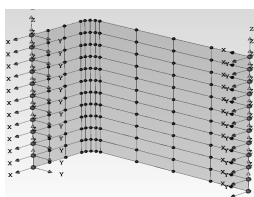
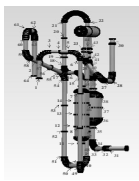
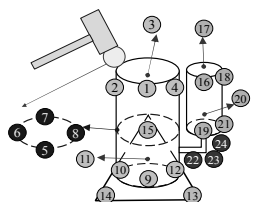
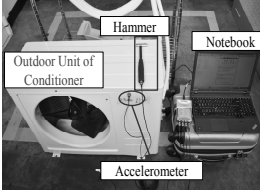
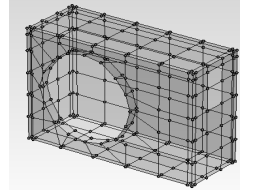
为了确认更新后的 OUC 模型与实际结构之间的等效性,需要进行实验验证。本文主要以实验模态分析为实验方法,将所获得的模态参数作为校正

理论分析模型的基准。

首先,针对要更新的零件与次系统结构进行实验模态分析,表 1 为室外机系统与次系统的实验规划总表。实验模态分析的规划可分为自由边界与系统边界;自由边界下的实验模态参数,主要作为校正有限元模型的几何形状、材料性质与接触条件的基准;另外,系统边界则是校正次系统结构的边界参数。

本文主要是对压缩机与冷凝器进行有限元模

表 1 室外机系统与次系统的实验规划总表
Table 1 Experimental plan for outdoor unit system and sub-system

	实际结构	实验布点
自由边界下压缩机		
自由边界下冷凝器		
系统边界之管路		
系统边界之压缩机		
外部机壳		

型的更新,因此须对实际压缩机与冷凝器进行实验模态分析,并获得结构的模态参数作为校正理论分析模型的接触参数;冷凝器在自由边界下的实验架设主要以钓鱼线悬吊来模拟自由边界,以固定冲击槌移动加速度计的方式进行实验,布点规划则是在冷凝器左右铜管;回转式压缩机在自由边界下的实验架设上,也是以钓鱼线悬吊来模拟自由边界,运用固定驱动器冲击锤,移动传感器加速规的实验方式进行。

最后对 OUC 系统内部管路、压缩机以及外部钣金进行系统边界下的实验模态分析,获得系统边界下的模态参数,并作为完整 OUC 有限元模型的校正基准,以利修正接触参数与边界参数。OUC 系统的实验方式是采用固定冲击锤移动三轴向加速度计进行敲击实验,通过敲击实验结果可获得结构的频率响应函数,再经由 ME'scopeVES 软件截取实验模态参数,包含固有频率、模态振型与模态阻尼比,完成 OUC 系统与次系统的实验模态分析。

2 空调室外机的有限元分析模型更新方法

有限元分析模型的等效性,对于响应预测以及设计变更显得相当的重要,更关系到结构仿真能否达到分析目的。本文延续文献[1]中的空调室外机系统的有限元模型,对其进行模型变更,使得 OUC

系统的分析模型在结构模态和频率域特性上能充分呈现空调室外机实际结构的振动特性。本节将对有限元分析模型的更新方法、分析设定、模型更新结果进行说明。

首先说明空调室外机模型更新方法。图 1 为空调室外机系统与次系统的模型更新架构图,更新的分析模型主要为冷凝器与回转式压缩机。在冷凝器模型更新上,改善了文献[1]的冷凝器分析模型几何上过于简化的缺点,更新后的冷凝器模型是以实体几何构建冷凝器的铜管,使其在物理性质上更贴近于实际结构;在回转式压缩机的更新上,更新后的压缩机模型加入了实体几何结构,包含马达转定子、泵组合件以及过滤瓶等重要组合件,主要改善了压缩机几何过于简化的缺点;对更新后的分析模型均用模型验证程序进行验证,以实验模态参数为基准,修正更新的分析模型。接着将完成验证后的冷凝器与压缩机模型加入 OUC 系统的模型内,替换须改善的零件与次系统结构,最后进行理论模态分析,求解理论模态参数,以利于后续与实验模态参数做比对验证,确认更新后的 OUC 模型是否等效于实际结构。

在 OUC 的理论模态分析设定上,将说明空调室外机系统有限元模型的建立方式、接触接口的分析假设、接触接口的仿真方式,其设定方式如下:

(1) OUC 的有限元模型均采用二次立体元素结构元素(Solid186、Solid187)构建,冷凝器管路采

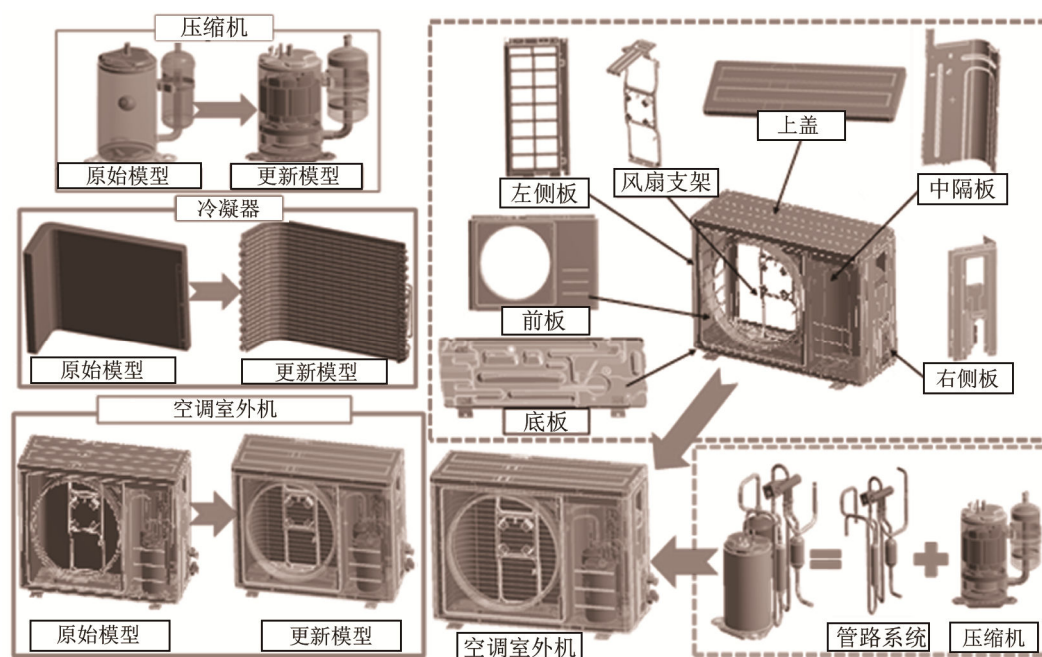


图1 空调室外机系统与次系统的模型更新架构图

Fig.1 Model update architecture diagram of the outdoor unit of conditioner system and sub-systems

用梁元素(188), 外壳钣金采用壳元素(Shell181)来构建有限元素模型, 质量元素(Mass21)仿真未加入风扇。

(2) OUC 的材料参数设定值则参照文献[1]中的材料参数, 该篇作者是对 OUC 各零件独立进行模型验证, 获得各零件的材料性质。

(3) 接触分析设定主要可分为 Bonded、No Separation 以及 Joint-fix。Bonded 用于模拟焊接与螺栓锁固, No Separation 用于仿真压缩机内部零件间的滑动接触, Joint-fix 用于模拟 OUC 钣金间的螺栓锁固。

(4) 空调室外机系统与次系统的分析模型均采用自由分割(Free Mesh)方式进行元素分割, 共 427 281 个节点、203 234 个元素。

(5) 边界条件则以底板支撑架为固定边界, 压缩机脚垫边界以弹性支撑方式仿真, 设定三轴方向 x 、 y 、 z 边界条件为: 4 620、4 620、29 000 N·m⁻¹, 旋转方向边界条件为: 100、80、9 N·m·rad⁻¹。

(6) 进行理论模态分析, 求得 OUC 系统结构的理论模态参数, 最后也进行简谐响应分析, 给予 x 、 y 、 z 三轴方向为 1 N 的简谐激振外力, 输出获得 OUC 结构三轴方向的频率响应函数。

3 模型更新结果与讨论

本文更新了 OUC 系统内部的冷凝器与压缩机

结构, 并进行了实验模态分析、理论模态分析以及简谐响应分析, 获得了模态域的固有频率、模态振型以及频率域的频率响应函数。将模态域与频率域的结果进行比对验证, 确认有限元分析模型的等效性。表 2 为空调室外机系统的外部机壳模态振型, 表 3 为空调室外机系统的压缩机模态振型, 表 4 为空调室外机系统的管路系统模态振型。图 2 为 OUC 模态域与频率域 z 方向响应结果比较图, 图 3 为模态域与频率域 y 方向响应结果比较图。验证结果说明如下:

(1) 外部机壳模态振型的物理意义, 实验与分析的模态振型均有良好的对应, 理论分析模型的固有频率接近实验的固有频率。

(2) 由表 3 中的 OUC 系统下的压缩机模态域结果, 可观察到 OUC 理论分析模型能完整仿真实际结构单纯压缩机摆动的 Local mode 现象, 固有频率的比对也相当接近。

(3) 通过表 4 的结果可知, 理论分析模型能够完全仿真压缩机做刚体运动而牵动管路摆动的现象; OUC 的 Global mode 条件下, 管路的模态振型特性也具有良好的对应关系, 固有频率的比对也相当接近。

(4) 图 2、3 为空调室外机的模态振型与频率响应函数(Frequency Response Function, FRF)比较图, 红色虚线为简谐响应分析求得的频率响应函数, 黑色曲线为实验的频率响应函数, 两曲线的峰值位置

表 2 空调室外机系统的外部机壳的振动模态
Table 2 Mode shapes of OUC external housing

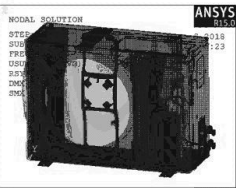
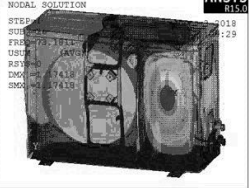
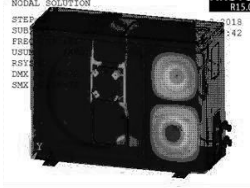
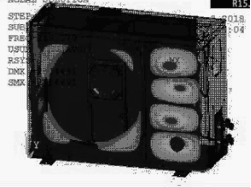
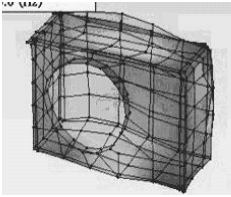
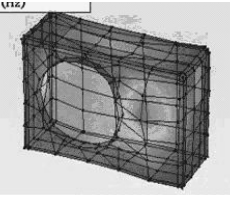
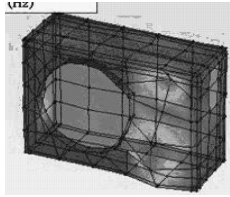
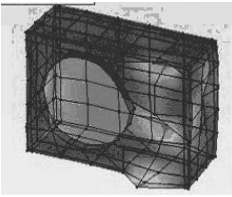
EMA			
U18-45.048 Hz	U26-73.181 Hz	U42-109.16 Hz	U95-213.18 Hz
			
Local mode-冷凝器	Local mode-室外机壳	Local mode-室外机壳	Local mode-室外机壳
FEA			
O12-45.6 Hz	O16-75 Hz	O22-111 Hz	O31-206 Hz
			
Local mode-冷凝器	Local mode-室外机壳	Local mode-室外机壳	Local mode-室外机壳

表 3 空调室外机系统压缩机的振动模态
Table 3 Mode shapes of OUC compressor

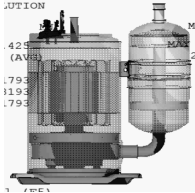
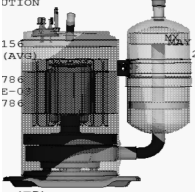
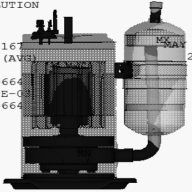
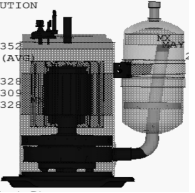
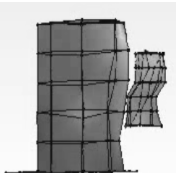
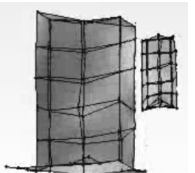
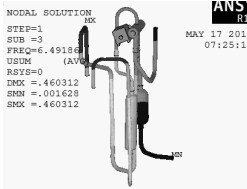
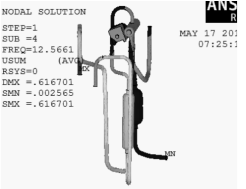
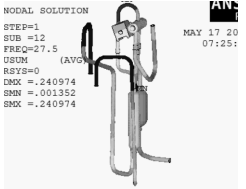
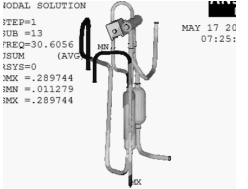
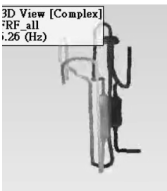
EMA			
U100-220.43 Hz	U154-317.16 Hz	U213-399.17 Hz	U351-594.35 Hz
			
压缩机、过滤瓶 x 方向摆动	压缩机、过滤瓶 x 方向摆动	压缩机、过滤瓶 y 方向摆动	过滤瓶 z 方向摆动
FEA			
C16-213 Hz	C18-308 Hz	O20-348 Hz	O24-568 Hz
			
压缩机、过滤瓶 x 方向摆动	压缩机、过滤瓶 x 方向摆动	压缩机、过滤瓶 y 方向摆动	过滤瓶 z 方向摆动

表 4 空调室外机管路系统的振动模态
Table 4 Mode shapes of OUC piping system

EMA			
U03-6.49 Hz	U04-12.566 Hz	U12-27.5 Hz	U13-30.606 Hz
			
Compressor Rigid - (y)	Compressor Rigid - (θ_z)	Global mode	Global mode
FEA			
P01-6.26 Hz	P02-13.1 Hz	P05-26.3 Hz	P06-32.5 Hz
			
Compressor Rigid - (y)	Compressor Rigid - (θ_z)	Global mode	Global mode

为结构的固有频率，且所对应的模态振型也具有相同的物理意义。

4 结 论

本文介绍了空调室外机(OUC)有限元模型的建模技术与模型更新方法，主要对冷凝器与回转式压缩机进行模型变更，同时进行模型验证程序，

以实验模态分析所获得的模态参数做为修正分析模型的基准；最后将更新完成的冷凝器与回转式压缩机分析模型加入 OUC 分析模型中，再一次进行模型验证程序；综合上述结果与讨论，总结如下：

(1) 室外机(OUC)内部的冷凝器与回转式压缩机进行模型变更，并通过模型验证程序，确认两种分析模型与实际间的等效性，完成结构的物理性质

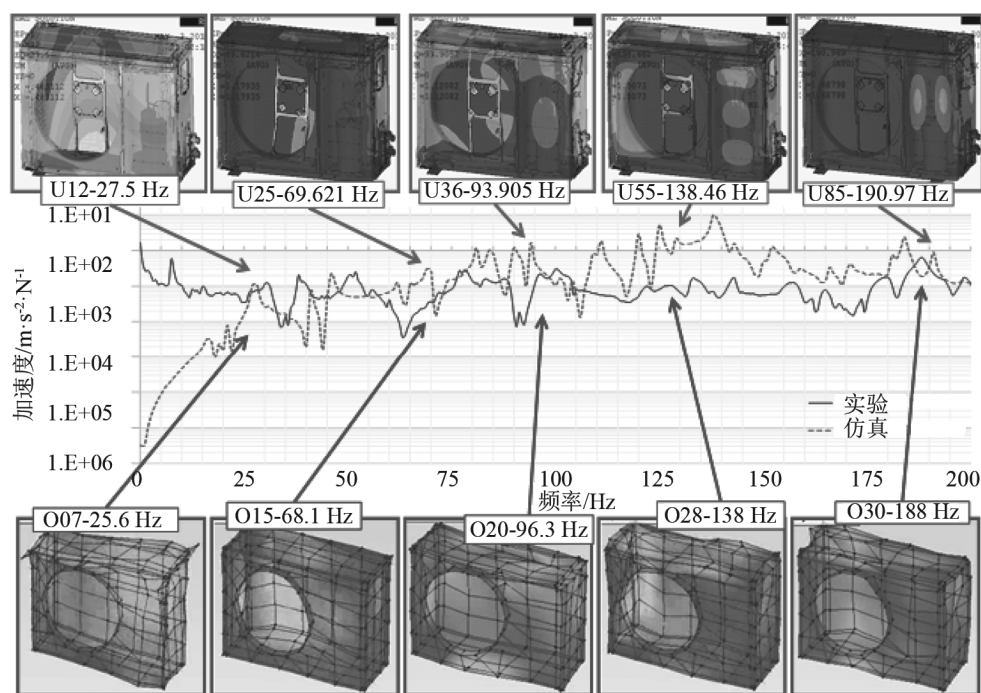


图2 空调室外机结构的频率相应曲线和相应的结构 z 方向位移的振动模式

Fig.2 Frequency response function of OUC structure and corresponding mode shapes of structural z direction displacement

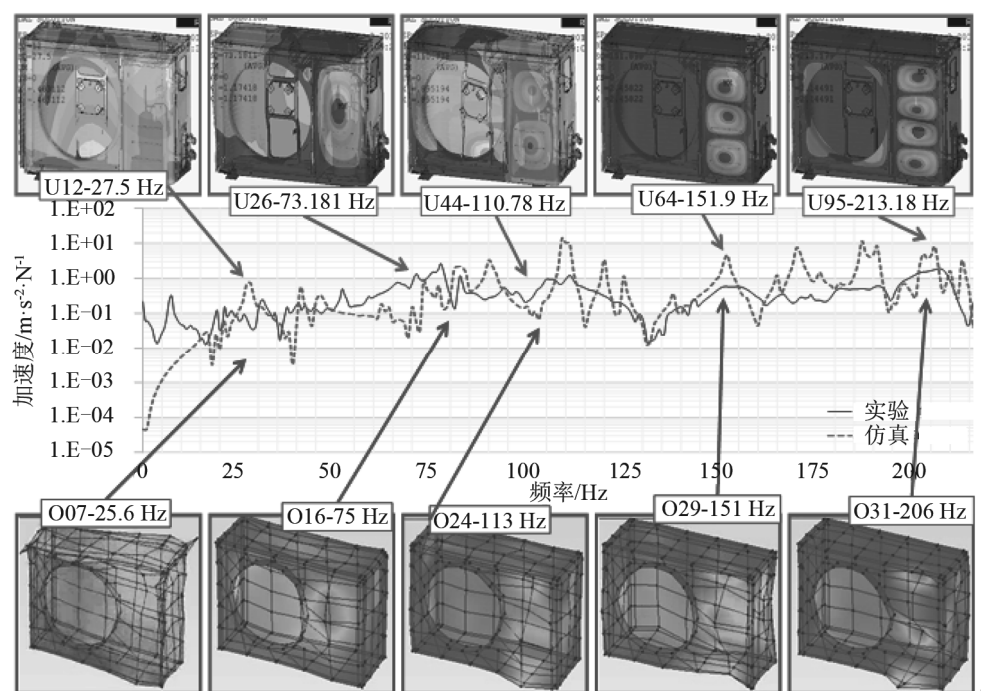


图3 空调室外机结构的频率相应曲线和相应的结构 y 方向位移的振动模式

Fig.3 Frequency response function of OUC structure and corresponding mode shapes of structural y direction displacement

确认, 包括几何形状、材料性质、接触接口和边界条件等。

(2) 将更新后的冷凝器与回转式压缩机模型加入到 OUC 模型内, 再一次进行模型验证, 在模态域的结果表明, 无论是外部机壳或是内部的压缩机

与管路系统, 在模态参数的比对上均有良好的对应性, 表示更新后的 OUC 模型足以显示实际 OUC 系统的结构振动特性。

(3) 在 OUC 的频率域比对中, 实验与分析的频率响应函数的峰值尖锐度有差别, 推测为理论分

析模型的简谐响应是以 Mode Superposition 进行计算的, 阻尼效应的输入是以一个常数值进行设定, 导致频率响应函数的振幅有差别, 但峰值频率所对应的模态振型有良好的对应关系, 因此确定完成空调室外机的模型更新。

(4) 本文进行 OUC 系统各零件的更新技巧、边界仿真、接触型式以及分析模型的验证方法, 为空调机设计开发人员建立空调系统仿真应用提供了标准的作业流程, 减少了设计开发所需的时间。

未来可进一步探讨 OUC 分析模型应用于振动与噪声的诊断方法, 通过分析模型的帮助观察到实验仪器无法测量到的内部振动特性, 借此辅助 OUC 的振动与噪声的诊断。

参 考 文 献

[1] 王栢村, 张博钧, 陈冠颀, 等. 空调室外机系统之模拟技术与实验

验证[C]//屏东科技大学暨北京科技大学第十二届学术交流研讨会. 屏东: 屏东科技大学出版社, 2017: A15.

[2] 丘晓宏, 温骊. 基于 ANSYS 的除湿机底盘强度分析及结构优化[J]. 家电科技, 2015, 18(5): 73-75.

QIU Xiaohong, WEN Li. Modal analysis for structure of floor-standing air conditioner[J]. China Appliance Technology, 2015, 18(5): 73-75.

[3] SILVEIRA M. Noise and vibration reduction in compressors for commercial applications[C]//International Compressor Engineering Conference, 2004: C065.

[4] PARK J, WANG S. Noise reduction for compressors by modes control using topology optimization of eigenvalue[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315(4-5): 836-848.

[5] KIM J D, LEE B C, BAE J O, KIM Y H. Noise reduction of a rotary compressor using structural modification of the accumulator[C]//International Compressor Engineering Conference, 1998: 1265.

[6] MAGLIE P, CARBINI R, WEIKERT S, et al. Efficient mechatronic evaluation of machine tool designs using model reduction[C]//Proceedings of the 12th Mechatronic Forum Biennial International Conference, 2010: 285-292.