

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.017

空调管路系统动态特性研究

蒋 邹, 戴隆翔, 侯凯泽, 罗良辰, 李 彬

(珠海格力电器股份有限公司 空调及系统运行节能国家重点实验室, 广东 珠海 519000)

摘 要:针对样机设计、打样阶段的空调管路出现振动、应变超标需反复整改问题,课题组通过对管路进行有限元模态仿真计算出其振型与固有频率;再进行模态测试,将仿真结果与测试值做对比,二者误差较小;通过对管路进行应力及振动测试分析,发现应力、振动的峰值点所对应的频率出现在管路固有频率附近,为共振引起。研究结果表明:在设计阶段通过有限元分析可计算出管路的模态与振型;为管路优化设计提供依据,同时节省了打样与实验成本。

关 键 词:空调管路;模态;固有频率;有限元分析

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)02-0095-04

Research on Dynamic Characteristics of Air Conditioning Piping System

JIANG Zou, DAI Longxiang, HOU Kaize, LUO Liangchen, LI Bin

(State Key Laboratory of Air-Conditioning Equipment and System Energy Conservation,
Gree Electric Appliances Inc. of Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the air-conditioner pipeline should be repeatedly rectified due to vibration and excessive strain during the prototype design and proofing stage, the modal and natural frequencies of the pipeline were calculated by finite element modal simulation. The simulation results were compared with the test values by modal test, it was found that the error was small. Through the stress and vibration testing analysis of the pipeline, it was found that the frequency corresponding to the peak point of stress and vibration appeared near the natural frequency of the pipeline, which was caused by resonance. The results show that the modal and vibration modes of the pipeline can be calculated by finite element analysis in the design stage, which can not only provide a basis for the optimal pipeline design, but also save the proofing and experiment costs.

Keywords: air-conditioner pipeline; modal; natural frequency; FEA (finite element analysis)

压缩机管路作为连接压缩机、冷凝器和蒸发器的重要部分,主要受压缩机激励和管内流体冲击激励^[1],管路不可避免的发生振动,当管路的固有频率与压缩机工作频率相近时,会产生强烈的共振,加速管路的疲劳破坏,减少使用寿命,降低空调的可靠性和质量。因此,研究管路的动态特性对于管路和管型的减振设计及修改,提高管路可靠性具有重大意义^[2]。陈超宇等^[3]通过模态仿真与谐响应分析,对管路进行改造。张旭等^[4]对旋涡压缩机配管进行模态仿真及测试,将吸气管的第2弯向下延伸,避开了共振频率,解决了该机组应变超标问题。郭亚娟^[5]通过添加阻尼来对压缩机配管振动进行衰减。赫家宽等^[6]通过对

管路进行模态分析并使用激振器来激励管路从而测试管路模态,并使用阻尼块来降低管路模态薄弱处的振动。黄辉等^[7]通过仿真模拟研究了不同管路折弯厚度对模态的影响。王宇华等^[8]建立了压缩机与管路的实体模型,并求解了系统的响应,预测响应较差的位置。薛玮飞等^[9]研究了仅包含配管系统的模态,仿真与测试结果误差较小。孔祥强等^[10]对空调配管系统进行模态求解,并分析了管内气柱压力对管路的响应。

课题组针对某款样机测试阶段的空调外机管路系统进行有限元仿真、模态测试和管路的应力测试,发现应力出现峰值所对应的频率点出现在管路的固有频率附近,为共振引起。在样机开发阶段,可通过有限元对

收稿日期:2019-07-18;修回日期:2020-01-15

第一作者简介:蒋邹(1991),男,广西桂林人,学士,主要研究方向为振动噪声测试与仿真。E-mail:jz117124@163.com

结构进行仿真分析,以指导结构的优化设计,避免样机在运行过程中发生共振。

1 模态分析基本理论

固有频率和振型为管路的固有特性,配管系统由多段不同厚度的铜管焊接在一起,还包含四通阀、消声器等部件,其振动可看成一个多自由度的振动,运动微分方程^[11]为

$$[m]\{\ddot{q}\} + [c]\{\dot{q}\} + [k]\{q\} = \{Q\}。 \quad (1)$$

式中: $[m]$ 、 $[c]$ 和 $[k]$ 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{q\}$ 和 $\{Q\}$ 分别为广义位移列向量和广义力列向量。

考虑 n 自由度无阻尼系统的自由振动,其运动方程为

$$[m]\{\ddot{q}\} + [k]\{q\} = \{0\}。 \quad (2)$$

式(2)可展开为

$$\sum_{j=1}^n m_{ij}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n k_{ij}\ddot{q}_j = 0。 \quad (3)$$

$$\text{设} \quad q_j = u_j f。 \quad (4)$$

式中: $j=1,2,\dots,n$, u_j 为一组常数; f 为时间相关的实函数。

则有:

$$\frac{q_j}{q_i} = \frac{u_j}{u_i} = \beta。 \quad (5)$$

式中 $i,j=1,2,\dots,n$ 。

将式(4)代入式(3)可得:

$$-\frac{\ddot{f}}{f} = \frac{\sum_{j=1}^n k_{ij}u_j}{\sum_{j=1}^n m_{ij}u_j}。 \quad (6)$$

式(6)左边仅与时间相关,右边仅与位移相关,要使等式两边成立,两边须等于1个常数,假定 λ 使等式成立,则有:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{f} + \lambda f &= 0; \\ \sum_{j=1}^n (k_{ij} - \lambda m_{ij})u_j &= 0。 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)的通解为 $f = C \cos(\omega t - \Psi)$, 式中 $\lambda = \omega^2$, 为简谐运动的频率的平方, C 和 Ψ 任意常数。 λ 应使方程有非零解,即:

$$[k]\{u\} - \omega^2[m]\{u\} = 0。 \quad (8)$$

式(8)有非零解的条件是行列式等于零,即:

$$\Delta(\omega^2) = |k_{ij} - \omega^2 m_{ij}| = 0。 \quad (9)$$

对式(9)和式(8)求解,即可获得系统的固有频率和模态向量。

2 空调管路有限元分析

此次研究的样机为变频机,其工作频率为 16 ~ 90 Hz,故设分析的频带范围的上限为 100 Hz。

将压缩机管路系统的三维模型导入到有限元软件中,对系统进行简化,如图 1 所示。压缩机脚垫装置用简化的质量点模型简化,在压缩机质心处施加质量与惯性矩,橡胶脚垫用 3 个三向弹簧替代,质心与三向弹簧之间,质心与吸、排气管口之间通过刚性梁连接。

对管路系统抽中面,定义管路、四通阀为壳单元,赋予厚度与材料属性。在四通阀处施加附加质量,使其质量与实际质量一致;管夹与管路做绑定约束;约束大阀门管口与冷凝管口的 6 个自由度。

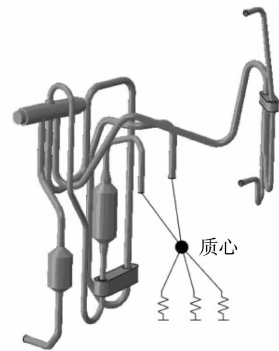


图 1 压缩机管路系统模型 I

Figure 1 Compressor piping system model I

同时建立仅包含管路的模型 II,即去除压缩机脚垫装置,如图 2 所示。模型 II 的处理与属性设置和模型 I 一致,约束各个管口的 6 自由度。

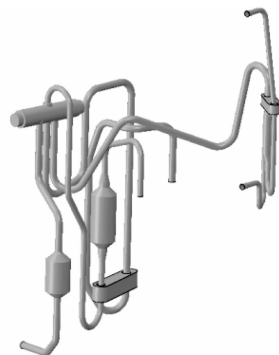


图 2 管路模型 II

Figure 2 Piping model II

分别对 2 个模型进行有限元分析,求解其模态,提取 100 Hz 以内的固有频率,如表 1 所示。

模型 I 和模型 II 的模态差异在低频,由于管路约束了与压缩机相连吸、排气管口的自由度,故除去了压缩机脚垫装置的影响,低频的刚体模态并未体现,管路作为压缩机管路系统的部分,因此其模态与压缩机管

路的模态基本吻合。

表1 结构固有频率

Table 1 Natural frequency of structure Hz

阶次	模型 I	模型 II	阶次	模型 I	模型 II
1	7.30	/	7	40.00	39.00
2	7.90	/	8	50.00	49.00
3	13.25	/	9	56.00	56.00
4	25.70	25.70	10	65.00	65.00
5	31.70	31.00	11	74.00	74.00
6	33.70	33.70	12	89.00	88.00

3 模态与应力测试

模态测试采用 LMS Test. Lab 数据采集系统、力锤及三向加速度传感器搭建测试系统,如图 3 所示。在管路的有限元模型中,选取模态测试的激励点与响应点,激励点与响应点应避开模态节点;并记录其坐标,在 LMS Test. Lab 软件中建立点线模型,如图 4 所示。结合管路结构的特点以及为避免传感器引起附加质量的影响,使用 3 个传感器,进行单点激励多点相应,在测试过程中移动传感器,传感器分布在不同的管路上。测试时力锤的锤击方向尽量与参考坐标系的方向一致,尽量避免人为误差。采用 PolyMAX 模块选取频率及计算振型,再通过 Modal Validation 模块对选取的频率进行验证。

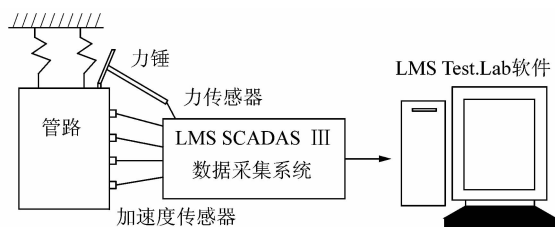


图3 试验流程图

Figure 3 Test flow

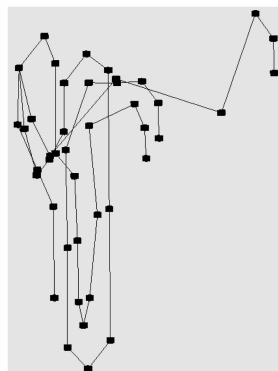


图4 点线模型图

Figure 4 Dot line model

测试的模态结果如表 2 所示。将测试的模态结果

与仿真的结果进行对比,发现低频第 1、第 5 阶时,模型 I 的值和测试值相差较大。出现该种情况与脚垫的简化和力学模型有关。空调实物上脚垫跟螺栓与机脚的约束方式为接触,而文中简化为三向弹簧,因此产生较大误差。

表2 结构测试固有频率

Table 2 Test frequency of structure Hz

阶次	测试	阶次	测试
1	6.2	7	40.3
2	7.4	8	52.0
3	13.0	9	55.4
4	24.2	10	65.8
5	28.7	11	77.4
6	34.2	12	88.4

在管路的吸气管的 1 弯侧、2 弯内,排气管的 1 弯内、2 弯内和四通阀的 1 弯内处粘贴三相应变片,如图 5 所示。采集各个工况下各个频率点稳定运行 10 s 的应变数据,依据测得应变计算出主应力,再合成等效应力。对测点处等效应力的时域数据进行傅里叶变换,得到运行工况下的等效应力频谱图,如图 6 所示。

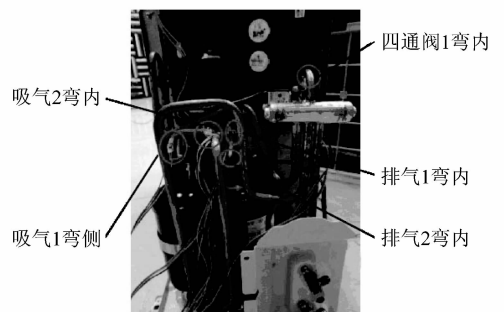


图5 应变片布置点

Figure 5 Strain gauge arrangement point

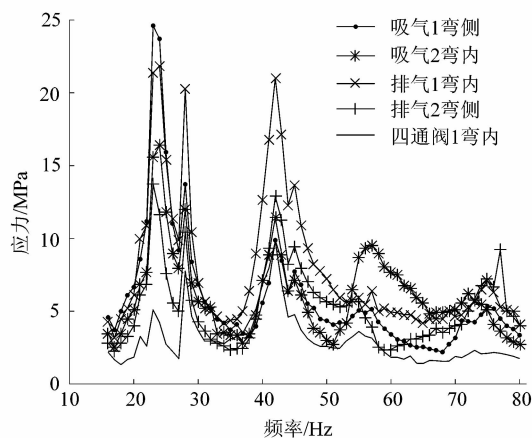


图6 等效应力曲线图

Figure 6 Equivalent stress curve

出现应力峰值点的频率为 24, 28, 41, 45, 56 和 76 Hz, 基本出现在固有频率点处。针对 45 Hz 应力峰值频率点, 通过在压缩机壁面和吸、排气管口、储液罐上粘贴三向加速度传感器, 采集管路和压缩机的振动数据, 如图 7 所示。发现该频率点主要由压缩机引起, 吸气管口及储液罐在 45 Hz 均出现振动峰值点, 为压缩机的强迫振动引起管路应力峰值。

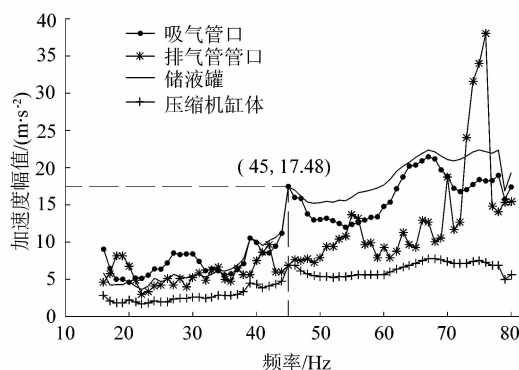


图 7 压缩机振动

Figure 7 Compressor vibration

4 结论

1) 建立的压缩机管路简化模型(模型 I)求解的模式与单管路(模型 II)模式结果基本吻合;与测试结果相比,在低频时模型 I 的模式误差较大。该误差主要由压缩机橡胶脚垫的简化造成的。若仅关注管路模式,可直接用单管路(模型 II)进行有限元分析。

2) 管路上发生应力过大的点基本在管路的固频点附近,因此在设计前期可通过有限元分析来预测管路的模式,从而在设计阶段规避样机的薄弱处或将其优化,节省打样时间与成本,提高效率。

参考文献:

- [1] 付永领,荆慧强.弯管转角对液压管道振动特性影响分析[J].振动与冲击,2013,32(13):165-169.
- [2] 范文强,何立东,张翼鹏,等. EVA 装置超高压压缩机出口管道振动分析及阻尼减振研究[J].机电工程,2019,36(11):1194-1197.
- [3] 陈超宇,林建中,胡晴.空调配管动态特性研究[J].电子科技,2017,30(9):112-116.
- [4] 张旭,高钦翔,李青,等.空调压缩机管路模式分析与模式测试[J].遵义师范学院学报,2018,20(6):109-111.
- [5] 郭亚娟.空调配管系统的减振研究与阻尼优化设计[D].上海:上海交通大学,2010:30-33.
- [6] 赫家宽,蒋邹,罗良辰,等.空调柔性管路模式测试与优化[J].环境技术,2019,37(1):86-91.
- [7] 黄辉,苏玉海,王继承.空调器压缩机配管有限元建模研究[J].流体机械,2010,38(6):74-77.
- [8] 王宇华,宋振东,程湘,等.压缩机及配管系统振动的有限元分析[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2017,35(1):1-5.
- [9] 薛玮飞,张智,陈进,等.空调配管模式仿真分析与实验研究[J].机械科学与技术,2010,29(6):822-825.
- [10] 孔祥强,陈丽娟,郑瑞,等.制冷压缩机配管系统模式分析及振动特性[J].北京工业大学学报,2016,42(6):825-831.
- [11] 师汉民,黄其柏.机械振动系统:分析·测试·建模·对策 上册[M].3版.武汉:华中科技大学出版社,2013:112-113.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子助力唐人神推进全新企业发展战略

西门子与唐人神集团股份有限公司(唐人神)正式签署咨询项目合同。西门子将通过其全面的管理咨询方法论助力唐人神“TRS313 追梦工程”愿景落地,打造卓越的全产业链农牧食品企业。西门子将帮助唐人神对其战略目标进行解耦和规划,并由此发展出可实施的数字化运营战略和人才培养体系。

“数字化和物联网(IoT)正在深刻地改变世界,积极拥抱这一变革的企业将成为行业未来发展的塑造者,我相信唐人神就是这样一家企业。”西门子(中国)有限公司执行副总裁、物联网服务事业部总经理朱晓洵博士表示:“西门子将凭借在数字化领域的先进技术和咨询方面的经验,为唐人神提供从战略制定、原型设计到实施的整体服务,全面助力其战略目标的落地,实现生产力和企业效益的跨越式发展。”

根据协议,西门子将在战略愿景、运营体系和人才建设方面帮助唐人神进行整体架构梳理和搭建:①在战略方面,西门子将帮助唐人神将其长期业务愿景进行梳理,并制定中长期战略路线。②数字化运营方面,西门子将定义唐人神未来数字化运营的场景蓝图并制定实施计划,以实现降本增效。③人才建设方面,将以建设唐人神大学为重点,从战略定位、能力模型、课程体系及核心课程 4 个环节入手,优化人才培养体系。同时,西门子还将进行定期追踪和诊断,及时结合执行情况进行修正和完善,从而确保战略的真正落地和推动唐人神在商业模式、组织模式与运营管理 3 个方面的不断提升。

唐人神“TRS313 追梦工程”已成为凝聚共识和齐心奋斗的重要思想指引,借助西门子的数字化战略咨询及实施方面的经验,实现集团长期业务愿景,把握未来加速增长与可持续发展的机遇。

(刘娟娟)