

涡旋压缩机管路系统振动特性分析及固定支承位置优化

[林江波, 戎青青, 孟兆华]

[丹佛斯 (天津) 有限公司, 天津市制冷空调压缩机技术企业重点实验室, 天津 301700]

【摘要】 管路系统的振动问题是制冷涡旋压缩机常见的问题之一。本文针对某一客户提出的排气管路振动过大的问题进行原因分析并提出改进方案。根据实验室大量的管路振动测试数据分析可知, 在管路系统的振动中, 机械振动占主要组成部分, 因此本文只考虑管路的机械振动而不考虑其内部气体的影响。利用基于有限元的 Ansys workbench 软件对管路系统进行结构模态分析和谐响应分析。通过模态分析, 得到了管路系统的固有频率及对应振型, 与压缩机运行频率及管路振动超标位置对比后, 确定了客户提出的管路超标问题是由于排气管路在第二阶固有频率处发生了共振。通过谐响应分析, 得到了在压缩机运行工况下, 排气管路系统的位移振动响应结果, 该结果与测试结果十分接近。根据原始管路的分析结果, 本文提出改变固定支承位置的优化方案, 并对比了不同支承位置对管路系统振动的影响, 最后选择了一种对降低位移响应效果最为显著的优化方案。

【关键词】 管路振动; 模态分析; 谐响应分析; workbench

Vibration characteristic analysis for the pipe system of scroll compressor and optimization for fixed supporting position

Rong Qingqing, Lin Jiangbo, Meng Zhaohua

[Danfoss (Tianjin) , 301700]

【Abstract】 Vibration of the piping system is one of the common problems of scroll compressors. This article analyzes the cause of the excessive vibration of the discharge pipe and proposes an improvement plan. According compressor pipeline vibration test data in the laboratory, mechanical vibration accounts for the main component of the vibration of the pipeline system. Therefore, this article only considers the mechanical vibration of the pipeline without considering the influence of its internal gas. The finite element based Ansys workbench software is used to carry out structural modal analysis and harmonious response analysis of the piping system. Through modal analysis, the natural frequency and corresponding vibration mode of the pipeline system are obtained. After comparing with the compressor operating frequency and the pipeline vibration exceeding position, it is determined that the pipeline exceeding the standard problem raised by the customer is due to the exhaust pipeline in the second Resonance occurred at the first natural frequency. Through the harmonic response analysis, the displacement vibration response results of the exhaust pipe system under the operating conditions of the compressor are obtained, and the results are very close to the test results. Based on the analysis results of the original pipeline, this paper proposes an optimization plan to change the fixed support position and compares the influence of different support positions on the vibration of the pipeline system. Finally, an optimization plan that has the most significant effect on reducing the displacement response is selected.

【Keyword】 pipe vibration; modal analysis; harmonic analysis, Ansys workbench

前言

对于涡旋压缩机管路系统, 管路振动问题是比较常见且会造成严重后果的问题之一^[1-2]。利用有限元软件 Ansys Workbench^[3]可以计算管路系统的振动特性以及在压缩机激励下的振动

响应，从而分析出管路系统振动过大的原因，并给出合适的改进优化方案。根据实验室大量的管路振动测试数据分析可知，在管路系统的振动中，机械振动占主要组成部分，因此本文只考虑管路的机械振动而不考虑其内部气体的影响。

本文针对某一客户提出的排气管路问题进行分析。该客户的系统应用的压缩机是变频和定频压缩机组成的并联机，在只有变频压缩机工作的情况下，测得排气管路某一弯管处的振动超出了标准值。本文利用有限元软件 Ansys Workbench 对排气管路进行了模态分析和谐响应分析。通过模态分析，得到了管路系统的前八阶固有频率及对应振型，与变频压缩机运行频率及管路振动超标位置对比后，确定客户提出的管路超标问题是由于排气管路在第二阶固有频率处发生共振引起了强烈的振动。通过谐响应分析，得到了在变频压缩机运行工况下，排气管路系统的位移振动响应结果，该结果与客户测试结果十分接近。

根据原始管路的分析结果，本文提出了改变固定支承位置的优化方案，并对比不同支承位置对管路系统振动的影响，选择了一种对降低位移响应效果最为显著的优化方案。

1. 涡旋压缩机管路系统的数学模型

涡旋压缩机的管路系统是一个连续的弹性体，它的振动微分方程[4]为：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

上式是 N 个线性微分方程的组合。式中，[M]、[C]、[K]分别表示管路系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；u 表示管路系统的振动位移向量；F 表示管路系统受到的外部激励向量。

如果上式(1)中的[C]和 F 均为零，即可得到管路系统的固有频率的数学模型，即：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

当管路系统受到的外部激励 F 是简谐的，即可以表示成正弦或余弦形式的谐波载荷时，则式(1)为管路系统谐响应的数学模型。

2. 排气管路振动问题分析

2.1 问题描述

某客户的系统应用公司的并联压缩机，由一个变频压缩机和一个定频压缩机组成。客户测试发现，当只有变频压缩机工作时，排气管路系统上，与定频压缩机相连的第二个弯管处的振动最为剧烈。

2.2 激振频率

激振频率为系统所使用的变频压缩机的工作频率 25~100Hz。由于低频振动对管路的危害远大于高频振动，因此本文只考虑 1 阶激振频率即基频的影响。

2.3 排气管路的模态分析

将排气管路的三维模型导入有限元分析软件 ANSYS workbench 中，管路系统与压缩机相连的排气管口端，冷凝器入口端以及固定支承处均施加固定约束，如图 1 所示。

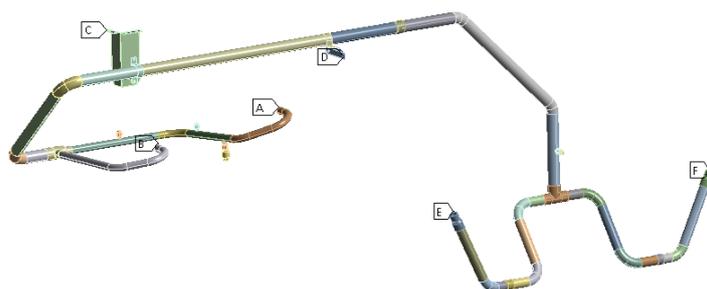


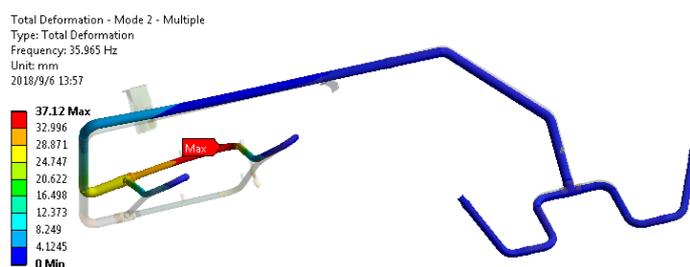
图 1. 排气管路系统的三维模型及固定约束

利用模态分析模块对排气管路模型进行分析，得到在激振频率范围内的前八阶固有频率，见表 1。

表 1. 排气管路系统的前八阶固有频率

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/Hz	33.6	36.0	39.7	47.8	63.8	66.3	77.5	83.9

当变频压缩机的工作频率连续变化时，排气管路系统在上述八阶固有频率处都有可能发生共振。与客户提供的管路振动超标位置作对比后，发现造成客户管路振动的原因是由于其在第二阶固有频率处发生共振，对应的振型如图 2 所示。


 图 2. 第二阶振型 $f_2=36\text{Hz}$

由于变频压缩机的工作频率在 25~100Hz 之间连续变化，完全避开激励频率共振区是不太现实的，因此本文从降低振动位移响应的角度解决问题。

2.4 排气管路的谐响应分析

涡旋压缩机稳定运行时，对排气管路的激励载荷可以简化为谐波载荷，因此可以通过谐响应分析模块求得管路系统在压缩机激振作用下的振动位移响应[5]。压缩机对排气管路系统的激振作用，可以通过压缩机排气管口进行传递，即将排气管口的振动位移或加速度作为排气管路系统的激振载荷。本文取实验室测得的管口沿三个方向的振动位移值作为外部激励载荷，激励频率范围为变频压缩机的工作频率范围 25~100Hz，每 1Hz 做谐响应分析。

当激振频率为 36Hz 时，排气管路系统的振动位移响应幅值的最大值为 283.0 μm ，此时管路的变形如图 3 所示。

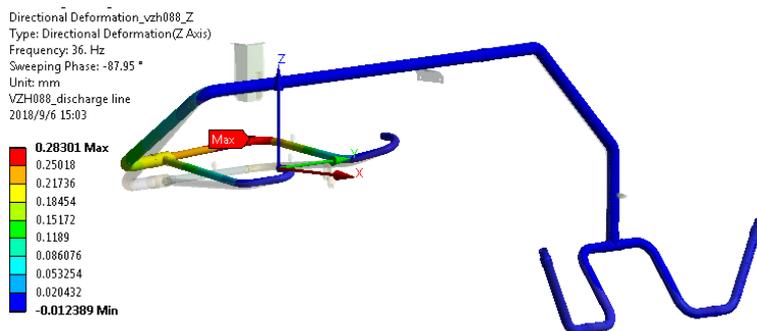


图 3. 排气管路系统的振动位移响应，激振频率为 36Hz

管路系统振动位移最大值及位置都与客户实测值一致，因此本文建立的有限元模型是有效可行的。

3 排气管路的固定支承位置优化

影响管路系统模态分析和谐响应分析结果的因素有很多，如管路弯曲角度、弯曲个数、管路长度、壁厚、固定支承、激励载荷大小等[1,6]。如果重新设计和布置管路，对于正在投产运行的管路系统是不切实际的，会造成极大的浪费。因此在不改变原有管道排布的情况下，最有效便捷的措施是调整固定支承的个数和位置。通过对比不同固定支承方案的位移响应结果，选择了相对最有效的改进方案，如图 4 所示。

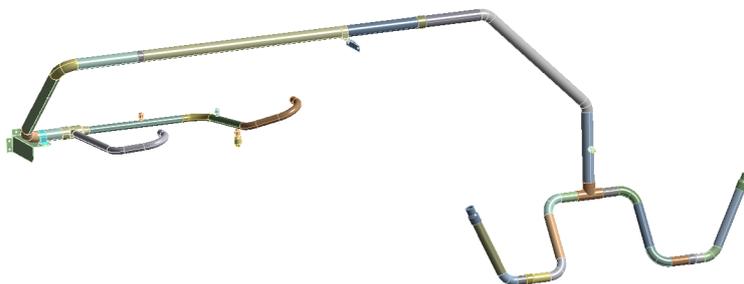


图 4.排气管路的固定支承位置改进方案

改进后排气管路系统的固有频率如表 2 所示。

表 2.改进后排气管路系统的前八阶固有频率

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/Hz	32.6	33.5	47.3	49.8	65.8	70.5	82.6	96.4

此时的管路系统，当激振频率为 70Hz 时，具有最大的振动位移响应值 86.6 μ m，如图 5 所示。与原始排气管路系统相比，管路的振动位移大大地降低了。

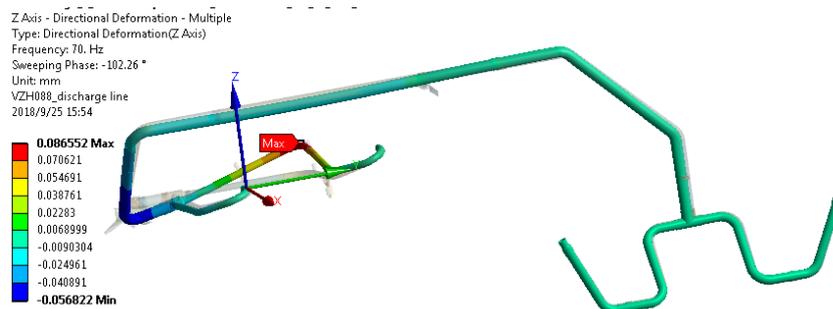


图 5. 改进后的排气管路系统的振动位移响应，激振频率为 70Hz

结论

(1) 对原始管路的模态分析表明，前 8 阶固有频率落在了压缩机激励频率共振区内，对比实测的位移超标位置，确定造成振动位移过大的原因是由于排气管路系统在第二阶固有频率发生了共振；

(2) 通过对原始管路进行谐响应分析后，得到在压缩机激励作用下，排气管路最大的位移响应值为 283.0 μ m，与客户提供的实测值十分接近，由此说明本文建立的管路系统有限元模型是有效可行的；

(3) 调整排气管路上固定支承的位置与个数，并比较不同方案下排气管路的谐响应结果，最终选择一种相对效果最显著的方案。与原始管路相比，改进后管路的振动位移响应明显的降低了，并能够满足客户的标准要求。

【参考文献】

- [1] 孔祥强, 陈丽娟, 郑瑞等, 制冷压缩机配管系统模态分析及振动特性[J], 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 825-831.
- [2] 张道刚, 王茂廷, 宋升, 基于 ANSYS 的往复式压缩机管线振动的减振分析[J], 当代化工, 2015, 44(2): 383-385.
- [3] ANSYS Help 18.2 Documentation.
- [4] 刘习军, 贾启芬, 张文德, 工程振动与测试技术[M], 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [5] Hiroki OTA, Ryoji SATO, Taichi SATO, Estimating stress of piping system excited by scroll compressor, Journal of Advanced Mechanical design, systems, and manufacturing, 2013, 7(1): 65-73.
- [6] 李树勋, 潘伟亮, 张喜军等, 往复式压缩机管道振动原因分析及约束位置优化分析研究[J], 2017, 54(4): 71-73.