

# 滚动转子压缩机转子组合结构振动特性分析与测试

邢金昕<sup>1</sup> 姜华伟<sup>2</sup> 冀凯<sup>1,2</sup> 孙伟<sup>1†</sup>

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819) (2. 沈阳华润三洋压缩机有限公司, 沈阳 110869)

**摘要** 为了避免压缩机转子系统在工作过程中的振动超标,需要对其开展系统化的动态优化设计,包括压缩机转子乃至整机的振动特性测试以及利用转子动力学对其建模与分析. 本文以转子系统组合件(泵组件+外壳组件)为研究对象,首先创建了压缩机转子系统三维实体有限元分析模型. 进一步,对转子系统的固有特性进行了分析,获得了前5阶固有频率与模态振型. 最后,对该滚动转子压缩机进行了动力学实验,校验了上述分析模型的合理性. 本文的研究可为压缩机系统的减振与降噪提供技术参考.

**关键词** 滚动转子压缩机, 转子组合结构, 振动特性, 测试与分析

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-024

## 引言

滚动转子旋转式压缩机由于结构简单、性价比高、易于大批量生产控制等特点,目前已成为家用空调压缩机的主要机型<sup>[1]</sup>. 压缩机转子系统在工作过程中要受到不平衡力、接触力、气动压力等多种周期性外力作用,如设计不当极易造成转子系统振动超标. 振动超标的转子系统会使整个压缩机系统振动和噪音增大,更严重的情况是,其会直接损害压缩机转子系统的零部件,例如,轴承磨损、电机的转子和静子相碰产生摩擦磨损等<sup>[2-3]</sup>,从而严重的降低了压缩机转子系统的可靠性.

为了避免压缩机转子系统在工作过程中的振动超标,需要对其开展系统化的动态优化设计,包括压缩机转子乃至整机的振动特性测试以及利用转子动力学对其建模与分析. 目前,大多数学者<sup>[4-6]</sup>对滚动转子压缩机的研究主要集中于噪声控制,对压缩机转子系统振动特性的分析明显不足. 部分学者已开始了关于转子系统振动特性的研究,例如,Seve等<sup>[7]</sup>用梁模型研究了压缩机转子的不平衡响应问题. Ferraris等<sup>[8]</sup>同样采用梁模型分析了气动力对转子系统不平衡响应的影响. Wang等<sup>[9]</sup>用三维模型分析分析了转子系统的固有特性和振动响应. 但就目前的研究现状来看,这方面的研究还很不充分. 主要表现为没有将压缩机转子系

统振动测试结果与分析有效地结合,来获得比较可靠的动力学预测模型.

本文正是基于上述研究成果开展滚动转子压缩机组合结构转子系统固有特性分析与测试的研究. 以转子系统组合件(泵组件+外壳组件)为研究对象,首先创建了压缩机转子系统三维实体有限元分析模型. 进一步,对转子系统的固有特性进行了分析,获得了前5阶固有频率与模态振型. 最后,对该滚动转子压缩机进行了动力学实验,校验了上述分析模型的合理性. 本文的研究可为滚动转子压缩机系统的减振与降噪提供技术参考.

## 1 滚动转子压缩机转子系统组合件的三维实体有限元建模

### 1.1 转子系统的组成

滚动转子压缩机转子系的几何结构模型如图1示. 滚动活塞被安装在偏心曲轴上. 因此,偏心曲轴驱动机构包括滚动活塞,以及叶片弹簧系统. 再加上上轴承和下轴承,所有这些回转机构组成的转子轴颈轴承系统. 下轴承、气缸、下轴承和上轴承由螺栓固定为一体,由气缸或上轴承与壳体焊接,保持固定. 滚动活塞和曲轴等运动件则由上、下轴承限制其位移.

为了便于实验和分析后续分析模型中去掉了叶片弹簧及滚套系统,并将壳体剖开了四分之一.

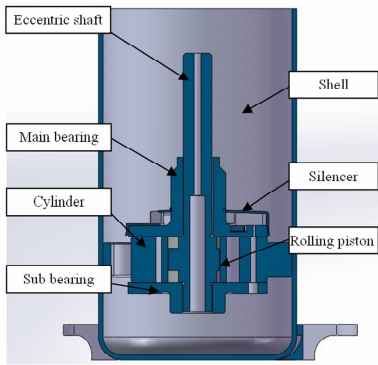


图 1 滚动转子压缩机转子系统的组成

Fig. 1 Therotor structure of rolling rotor compressor

## 1.2 有限元建模

用 Pro/E 软件建立各转子部件的三维 CAD 模型并装配在一起,为了与后续实验相一致,同样略去其四分之一. 将所创建的模型导入到 Workbench,创建有限元模型,见图 2.

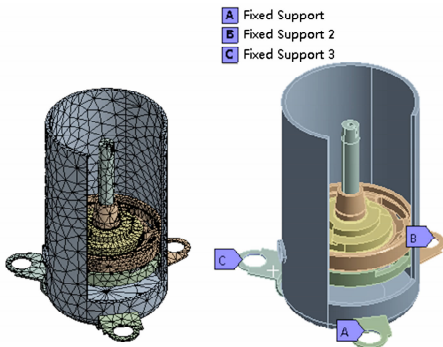


图 2 转子系统组合结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the rotor system

在该模型中,采用 SOLID187 实体单元建立压缩机转子的机械本体,采用接触单元 CONTA174,目标单元 TARGE170 建立接触对. 用接触对分别联接上轴承与气缸、下轴承与气缸、气缸与外壳等,并对安装底脚进行全约束,从而形成完整的有限元分析模型. 在该模型中,总共有 49385 个节点,28891 个单元,其中接触单元 3240 个.

为了便于分析对该组合结构也进行了简化,具体为:

(1)在建模时简化倒角、倒圆和油槽等特征. 并删除一些对于固有频率影响不大的元件,如气缸中的弹簧.

(2)在实际的状态下滚动转子压缩机转子系统的上、下轴承与气缸部分是由螺栓螺母链接为一体,并由主轴承点焊在壳体上固定. 本次分析将转

子系统各元件间的关系简化为固定约束,并将主轴承与壳体的关系也简化为面与面的固定约束.

## 2 动力学特性分析

选用 Workbench 的 Engineering Data 模块和 Modal(ANSYS)模块进行求解固有频率. 转子部件的具体材料属性见表 1.

表 1 转子系统主要部件的材料参数

Table 1 Materialproperty of the components of the rotor system

Parts	Material	Elastic modulus /MPa	Poisson ratio	Density /( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
Shell	SPHE	205000	0.32	0.0000078
Silencer	SPCC	210000	0.28	0.0000078
Mainbearing	HT250	138000	0.26	0.00000728
Subbearing	HT250	138000	0.26	0.00000728
Cylinder	HT250	138000	0.26	0.00000728
Eccentricshaft	HT300	143000	0.27	0.0000073

分析获得的转子系统各阶频率见表 2,模态振型见图 3.

表 2 计算获得的转子系统固有频率

Table 2 Natural frequencies obtained by numerical simulation

Order	Frequency/Hz
1	205.2
2	792.5
3	843.9
4	1272.3
5	1558.2

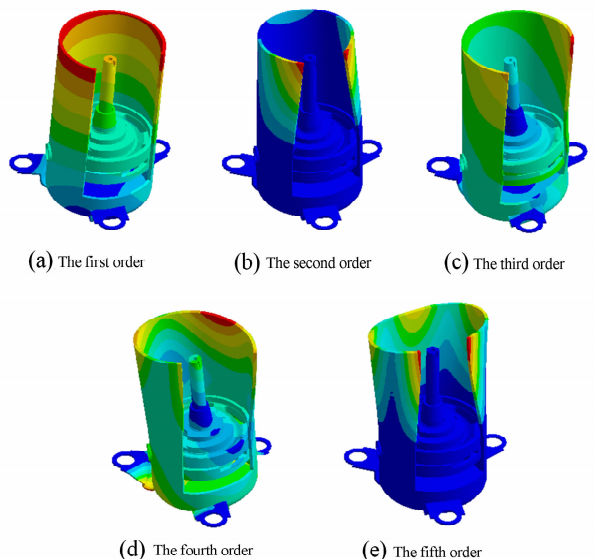


图 3 转子系统约束状态下固有振型

Fig. 3 Modal shapes of rotor system under the constraint condition

各阶次模态振型的特点如下:第 1 阶固有振型使转子系统在径向受到弯曲,轴段上部是整个转子

系统弯曲变形最大的地方;第2阶固有振型使转子系统沿轴向受到弯曲,壳体切口处变形较大,应力较大的部位也集中在这个地方;第3阶固有振型使转子系统沿轴向受到扭曲,转子系统的气缸和副轴承处变形较大,应力较大的部位也集中在这两个地方;第4阶固有振型使转子系统沿轴向受到弯曲,转子系统的气缸和副轴承处变形较大,应力较大的部位也集中在这两个地方;第5阶振型图上,固有振型使转子系统沿轴向受到弯曲,壳体切口处变形较大,应力较大的部位也集中在这个地方.通过以上分析可知,转子系统约束态下的振型都是以在轴向的弯曲和扭转表现出来的,扭转的地方大多在转子系统的气缸和副轴承处,应力较大部位也集中在这些地方.

### 3 转子系统固有特性测试

#### 3.1 测试系统

整个测试基于 LMS 模态振动测试系统,主要包括:数据采集前端、模态力锤、加速度传感器、高性能笔记本电脑等.相关仪器型号见表 3.

表 3 主要测试仪器

Table 3 The main test instrument

NO.	Instrument
1	KINGDESIGN EM-1000F shaker
2	LMSdata acquisition and controller
3	BK 4517 acceleration sensor
4	CA-YD-182A acceleration sensor
5	PCB086C01 modal force hammer
6	LMS. Testlab workstation

测试现场见图 4. 其中①,②,③处粘贴轻质传感器,④,⑤处为联能加速度传感器. 整个实验的仪器布置框图见图 5.

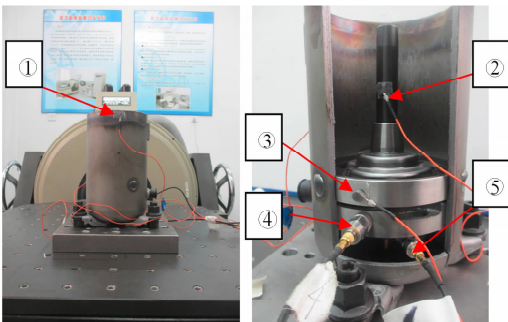


图 4 转子系统测试现场

Fig. 4 Testing on the rotor system of rolling rotor compressor

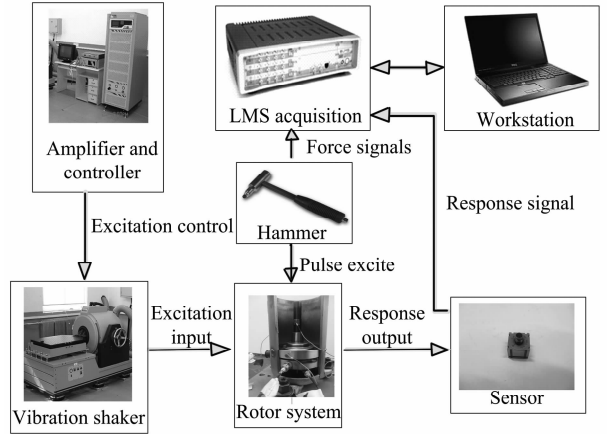


图 5 实验仪器的布置

Fig. 5 Arrangement of the test instrument

#### 3.2 测试过程及测试结果

首先选用传统的锤击法粗测滚动转子压缩机转子系统组合件的固有频率,由测得的频响函数峰值辨识出固有频率值.进一步,采用振动台扫频法精确测试转子系统组合件的固有频率.为了完成振动台扫频测试,需要确定振动台扫频带宽、控制扫频速度(慢扫),并在保证有效消除瞬态振动的前提下记录扫频信号等操作.详细测试过程描述如下:

##### (1) 完成试件装卡

将壳体上的装夹角用 3 个 M8 螺栓固定在夹具上,并通过夹具联接到振动台上,并在整个转子系统上粘贴传感器,具体位置见图 4. 这里加装了多个传感器,旨在能更加精确的测试转子组合件系统的振动特性.

##### (2) 锤击法粗测转子系统的固有频率

通过锤击法试验模态测试,并初步获得固有频率.使用力锤分别对对转子系统 1 点至 5 点沿  $z$  方向进行激振,通过 LMS TestLab 软件进行数据采集和分析,初步获得转子系统前五阶频响函数(见图 6),至少测试二次,直到各次测试结果相差不大为止.说明装夹部分受力已经趋近于平稳,尽量消除装夹角与夹具之间结合面的弹性变形对测试的影响.

##### (3) 振动台扫频精确测试固有频率

将振动台的激励模式设置为加速度扫频,激励加速度的峰值为  $1g$ ,根据锤击测试的结果,在各阶固有频率的 75% ~ 125% 选取扫描频段,在此频段内以  $1\text{Hz/s}$  的扫描速度对转子系统进行基础激励,通过 LMS TestLab 软件获得其“时间-频率-振动加速度”三维瀑布图,由三维瀑布图可读取各阶次的固有频率,具体结果见表 4. 部分测点(例如 2,3,4)可能由于其靠近某些阶次的模态振型的节点,从而

不能有效捕捉该阶的共振频率,所以表 4 中会存在部分测点的数据缺失的现象。

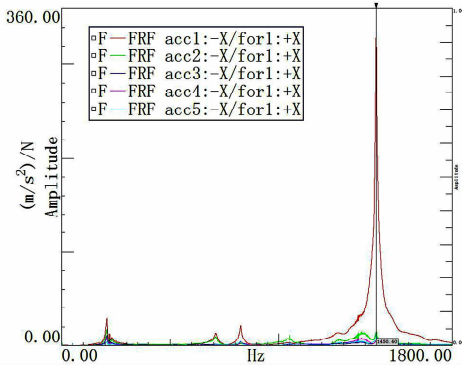


图 6 锤击测试获得的频响函数

Fig. 6 Frequency response function obtained by hammer test

表 4 各测点扫频测试获得的固有频率

Table 4 Natural frequencies of various measuring points obtained by sweeping test

Order	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5
1	208.0	208.0	208.5	208.5	208.0
2	710.0	-	700.0	-	709.5
3	827.0	825.5	828.0	828.5	827.5
4	1363.5	1363.5	1363.5	1364.5	1364.5
5	1460.0	1460.5	-	-	1462

图 7 为测点 1 前 5 阶的三维瀑布图,其余与之类似。

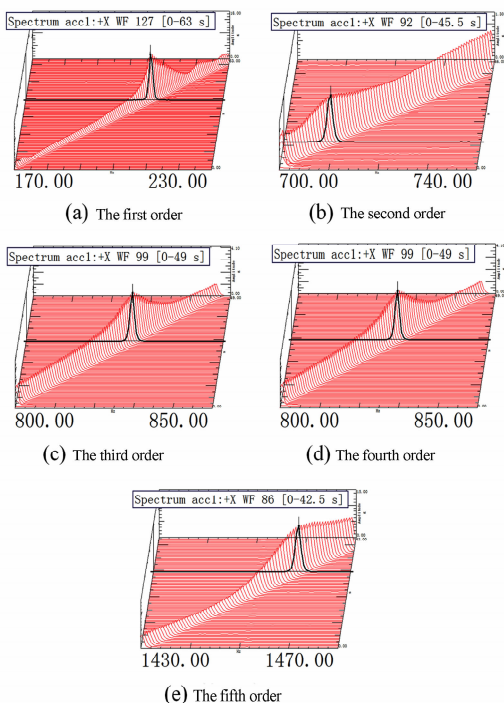


图 7 转子系统前 5 阶扫频瀑布图

Fig. 7 Sweeping waterfall diagrams of the first 5 orders for the rotor system

将此测试值与分析值的比对见表 5,最大偏差小于 10.4%,由此证明了所创建分析模型的合理性。

表 5 测试及分析结果

Table 5 Testing and analysing results

Order	Test/Hz A	Analysis/Hz B	Difference (B - A) / A × 100%
1	208.0	205.2	1.3%
2	710.0	792.5	-10.4%
3	827.0	843.9	-2.0%
4	1363.5	1272.3	7.2%
5	1460.0	1558.2	-6.3%

## 4 结 论

(1) 以转子系统组合件(泵组件 + 外壳组件)为研究对象,创建了该转子组合结构的有限元分析模型,求解了固有频率和模态振型,并对模态振型的状态进行了评述。

(2) 搭建了该组合件的振动特性测试系统,主要由振动台扫频激励获得该组合件的固有频率。

(3) 将分析结果预测值进行了对照,结果表明固有频率计算,最大偏差小于 10.4%,进而证明了所创建模型的合理性

本文的研究可为压缩机系统的减振与降噪提供技术参考。

## 参 考 文 献

- 樊灵,靳春梅,孙国基,等. 变频旋转式压缩机的研究现状与进展. 流体机械, 2002,30(1):29~31,41 (Fan L, Jin C M, Sun G J, et al. Status and development of inverter controlled rotary compressor. *Fluid Machinery*, 2002,30(1):29~31,41 (in Chinese))
- Levecque N, Mahfoud J, Violette D, et al. Vibration reduction of a single cylinder reciprocating compressor based on multi-stage balancing. *Mechanism and Machine Theory*, 2011,46(1):1~9
- Park J, Wang S. Noise reduction for compressors by modes control using topology optimization of eigenvalue. *Journal of Sound and Vibration*, 2008,315(4):836~848
- 刘元峰,赵玫,徐百平,黄晓峰. 家用空调器减振降噪研究综述与展望. 振动与冲击, 2005,24(4):120~121 (Liu Y F, Zhao M, Xu B P, et al. The research review and prospect of the household air conditioner vibration noise reduction. *Journal of Vibration and Shock*, 2005,24(4):120

- ~ 121 (in Chinese))
- 5 杨伟明, 屈宗长. 滚动转子式压缩机的噪声控制分析及降噪措施. 压缩机技术, 2004, 2: 13 ~ 14 (Yang W M, Qu Z C. Noise control analysis and noise reduction measures of the rolling rotor compressor. *Compressor Technology*, 2004, 2: 13 ~ 14 (in Chinese))
  - 6 杨露萍, 邹真. 滚动转子式压缩机噪声分析及降噪措施. 计量与测试技术, 2006, 33(4): 28 ~ 31 (Yang L P, Zhou Z. Noise analysis and noise reduction measures of rolling rotor compressor. *Metrology and Measurement Technique*, 2006, 33(4): 28 ~ 31 (in Chinese))
  - 7 Seve F, Berlioz A, Dufour R, et al. On the unbalance re-  
sponse of a rotary compressor. Fifteenth International Compressor Engineering Conference at Purdue University, West Lafayette, 2000
  - 8 Ferraris G, Andrianoely M A, Berlioz A, et al. Influence of cylinder pressure on the balancing of a rotary compressor. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 292(3): 899 ~ 910
  - 9 Wang Z, Yu X, Liu F, et al. Dynamic analyses for the rotor-journal bearing system of a variable speed rotary compressor. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(7): 1938 ~ 1950

## ANALYSIS AND TEST OF VIBRATION CHARACTERISTICS ON ROTOR COMPOSITE STRUCTURE OF ROLLING ROTOR COMPRESSOR

Xing JinXin<sup>1</sup> Jiang HuaWei<sup>2</sup> Ji Kai<sup>1,2</sup> Sun Wei<sup>1†</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Huarun Sanyo Compressor Limited Liability Corporation, Shenyang 110869, China)

**Abstract** In order to avoid excessive vibration of the compressor rotor system during operation, it is necessary to carry out a systematic dynamic optimization design, including testing the vibration characteristics of compressor rotor and the whole machine as well as modeling and analysis based on rotor dynamics. In this paper, the rotor composite system (pump assembly and shell assembly) is taken as an example for the investigated subject. Firstly, a three-dimensional solid finite element model of the compressor rotor system was proposed. The natural characteristics of the rotor system were analyzed through the numerical model, and five natural frequencies and mode shapes were obtained. Finally, the rationality of the analysis model was verified against the results of dynamical experiment. The study in this paper can provide essential technical support to reduce the vibration and noise of the compressor system.

**Key words** rolling rotor compressor, rotor composite structure, dynamics characteristics, test and analysis