

# 涡旋压缩机曲轴及曲轴部件的有限元分析\*

□ 刘涛 □ 刘袁帅

兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

**摘要:**根据油润滑涡旋压缩机的动力学特性,建立曲轴及曲轴部件两种机构的物理模型和有限元模型。利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对涡旋压缩机曲轴及曲轴部件的固有特性进行分析,得出前六阶固有频率及各阶振型。分析比较两种情况下固有频率和振型的差异,为曲轴的优化设计与涡旋压缩机的振动分析提供相关依据。

**关键词:**曲轴 涡旋压缩机 模态分析

中图分类号:TH455

文献标志码:A

文章编号:1000-4998(2016)09-0005-04

**Abstract:** According to the dynamics of scroll compressor for oil lubrication, the physical model and finite element model of two mechanisms i.e. the crankshaft and the crankshaft parts were established. With finite element analysis of the inherent characteristics of the crankshaft and crankshaft parts in the scroll compressor by software ANSYS Workbench, the top six orders of natural frequencies and the vibration mode for each order were obtained. By analyzing and comparing the differences of inherent frequencies and vibration mode in both cases, it is available to provide the evidence for optimum design of the crankshaft and vibration analysis of the scroll compressor.

**Key Words:** Crankshaft Scroll Compressor Modal Analysis

## 1 课题背景

涡旋压缩机是一种新型的容积式流体机械,具有效率高、体积小、噪声低、结构紧凑、质量轻、零件少、省材及运转平稳等特点,目前广泛用于空调制冷、各种气体压缩、发动机增压,还可用作真空泵<sup>[1]</sup>。涡旋压缩机主要的零部件有动静涡旋盘、曲轴、平衡铁、轴承、支架和防自转机构等,这些零部件的设计、加工和受力变形会对涡旋压缩机的工作性能和可靠性产生很大的影响。

曲轴作为涡旋压缩机的驱动部件,安装在主副轴承之间,偏心部分与动静涡旋盘相连,驱动动静涡旋盘的啮合,因此曲轴及曲轴部件整个动态工作过程的稳定性较大程度地影响着压缩机的工作状态。现有的有限元分析软件已经相当成熟,通过有限元分析软件 ANSYS<sup>[2]</sup>进行模态分析,可以更加直观地了解曲轴部件和曲轴的固有特性<sup>[3-4]</sup>。模态分析用于分析结构的振动特性,即确定结构的固有频率和振型。模态分析包括建模、网格划分、施加载荷及约束、扩展模态、求解和查看结果等几个步骤,可快速计算出结果,从而得到曲轴结构刚

度的薄弱环节,以及结构的不合理部分。

笔者以某系列涡旋压缩机为研究对象,利用 SolidWorks 三维建模软件和 ANSYS 有限元分析软件,通过对曲轴和曲轴部件进行模态分析,获得前六阶固有频率和振型,并进行对比,发现两者之间存在差异的原因,从而为曲轴的设计及优化提供可靠的试验数据<sup>[5-6]</sup>。

## 2 物理模型

### 2.1 工作原理

涡旋压缩机的动力源于电机驱动,电机将磁场能转换为机械能传递到曲轴,曲轴的偏心部分驱动动涡旋盘绕主轴中心公转,使动静涡旋盘啮合,从而实现了封闭工作腔容积的周期性变化,实现气体的吸入、压缩和排出。安装在曲轴上的主副平衡铁既能使动涡旋盘由于转动而产生的旋转惯性力平衡,又能使惯性力矩平衡,使曲轴运转稳定,以免干涉动涡旋盘的正常工作。主副轴承利用油膜的压力可以调整曲轴的运行状态。

根据具体结构建立曲轴与曲轴部件的结构示意图,如图 1 和图 2 所示。

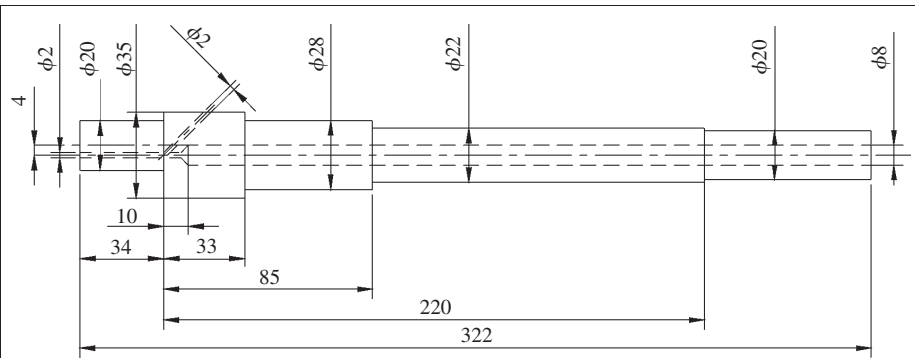
### 2.2 材料力学特性

#### 2.2.1 曲轴材料 45 钢

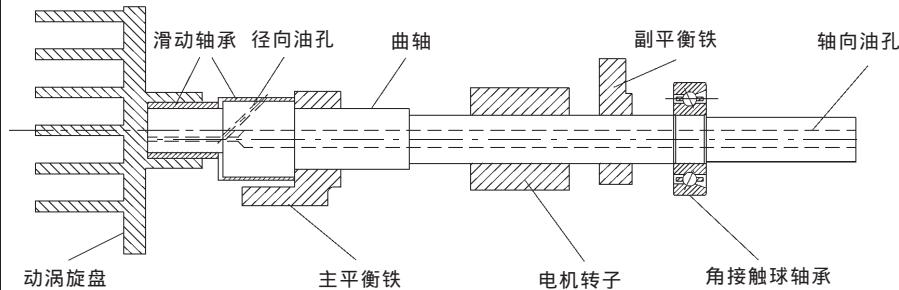
材料参数:弹性模量  $E_z=210$  GPa,泊松比  $\mu_z=0.3$ ,

\* 国家自然科学基金资助项目(编号 51265027)

收稿日期:2016年3月



▲图1 曲轴的结构示意图



▲图2 曲轴部件的结构示意图

密度  $\rho_z=7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

### 2.2.2 动涡旋盘材料灰口铸铁 FC250

材料参数:弹性模量  $E_p=113 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu_p=0.26$ ,

密度  $\rho_p=7.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

### 2.2.3 主副平衡铁材料

材料参数:弹性模量  $E_t=210 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu_t=0.3$ ,密度  $\rho_t=7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

## 3 有限元模型

### 3.1 有限元理论

模态分析即自由振动分析,是研究结构动力特性的一种近似方法,属于系统辨别方法在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型<sup>[7-9]</sup>。模态分析的经典定义是将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程组解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数。坐标变换的变换矩阵称为模态矩阵,其每列为模态振型。

对于模态分析,振动频率  $\omega_i$  和模态  $\phi_i$  的方程表达式为:

$$([K]-\omega_i^2[M])\{\phi_i\}=0 \quad (1)$$

式中:[ $K$ ]为刚度矩阵;[ $M$ ]为质量矩阵。

模态分析的最终目标是识别出系统的模

态参数,为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报、结构动力特性的优化设计提供依据。

### 3.2 约束条件

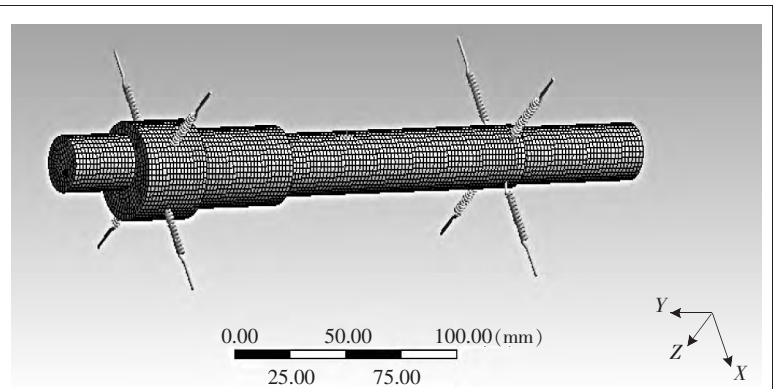
根据曲轴的安装位置和其它零部件之间的装配关系,建立较为准确的约束模型,将曲轴上的滑动轴承以及角接触球轴承的接合面用4根弹簧阻尼单元来代替<sup>[10]</sup>,滑动轴承刚度为  $2.4777 \times 10^4 \text{ N/mm}$ ,角接触球轴承刚度为  $1.9904 \times 10^4 \text{ N/mm}$ 。

### 3.3 网格划分

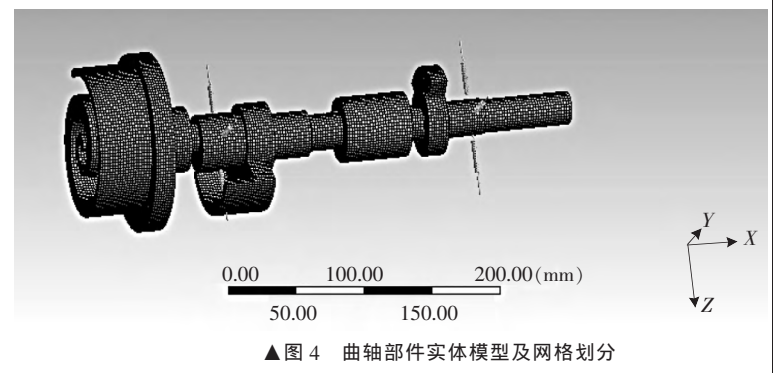
根据涡旋压缩机曲轴和曲轴部件的具体结构,利用 SolidWorks 软件建立实体模型,然后将实体模型保存为 .x\_t 格式文件,并导入 ANSYS Workbench 中进行网格划分,从而得到有限元模型。模型如图3和图4所示。

### 3.4 曲轴和曲轴部件的模态分析

曲轴前六阶固有频率所对应的振型,以及相应振型下曲轴部件的前六阶固有振型如图5和图6所示,参数见表1。



▲图3 曲轴实体模型及网格划分



▲图4 曲轴部件实体模型及网格划分



表 1 涡旋压缩机曲轴及曲轴部件的前六阶固有频率 Hz

零部件	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶	第六阶
曲轴	967.95	978.72	1 358.8	1 359	1 678.2	2 145.5
曲轴部件	227.5	327.15	333.05	788.71	802.95	1 288.5

## 4 结果分析

通过图 5、图 6 和表 1 比较分析曲轴及曲轴部件这两种结构下的频率和振型,可以得到如下结论。

(1)曲轴前四阶频率的振型说明,在曲轴的下端,即在吸油口部分容易发生振动;第五阶和第六阶频率的振型说明,振动的位置转移到了曲轴偏心段;曲轴部件前三阶频率的振型说明,在动涡旋盘上容易发生振动;第四阶和第五阶频率的振型说明,共振位置转移到了电机转子位置,而曲轴下端吸油口位置在第六阶频率时才会发生共振。在实际工况下,曲轴下端部分无约束,是振动最容易发生的区域,因此动涡旋盘在设计时

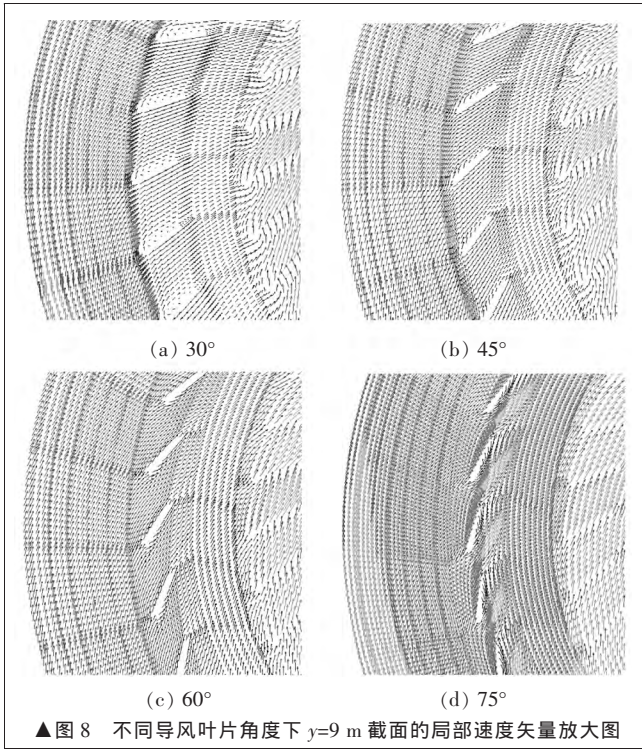
其刚度和强度都应予以加强。

(2)曲轴部件,即装配体的固有频率比曲轴的频率低,而且相当明显。曲轴第一阶固有频率是 967.95 Hz,曲轴部件的第一阶固有频率是 227.5 Hz,曲轴部件的第一阶固有频率比曲轴的第一阶固有频率小约 76.5%,说明各零部件在进行装配之后动态特性会显著下降,更容易被电机和动静涡旋盘摩擦所产生的激振力而引起共振,主要原因是动涡旋盘、主副平衡铁这些较大惯性质量元件对曲轴固有特性有影响。由于本涡旋压缩机的电机-曲轴转速为 2 880 r/min,工作频率为 48 Hz,比曲轴部件的一阶固有频率低,因此曲轴部件能够有效避开共振区域,进而能安全工作。

## 5 结束语

笔者通过对涡旋压缩机曲轴和曲轴部件两种结构

(下转第 11 页)



▲图8 不同导风叶片角度下  $y=9\text{ m}$  截面的局部速度矢量放大图

60°时,选粉机内的气流分布较为合理,导风叶片退行面和进入面的局部涡流现象很少<sup>[7]</sup>。

## 5 结论

本研究利用 CFD 软件模拟了辊磨机内部的三维强旋湍流场,得出如下结论。

(1) 辊磨机流场速度最大值出现在风环处,该处压力损失也较大。合理设计风环结构对提高选粉效率和降低压力损失有重要意义。流场中存在大量涡流,涡

流能延长物料和热风进行热交换的时间,但涡流过多将产生过粉磨现象。

(2) 选粉机导风叶片对来自辊磨机下部的气流具有导向作用,使气流均匀地进入分级环区域,转笼的高速旋转会造成较大的压力损失。

(3) 导风叶片和转子叶片等结构对流场影响较大,笔者对比了 4 种不同安装角下导风叶片处涡流的情况,得出当导风叶片安装角为 60°时涡流最小。

## 参考文献

- [1] 董聪,李双跃,暴海军,等.立磨系统风量对物料重力分级影响模拟分析[J].浙江工业大学学报,2013,41(3):321-326.
- [2] 时彤,姜大志,孙俊兰,等.基于 CFD 数值模拟的粉煤灰脉冲气流干燥器干燥性能的研究[J].机械制造,2014,52(8):34-37.
- [3] WANG J H, CHEN Q R, KUANG Y L, et al. Grinding Process within Vertical Roller Mills: Experiment and Simulation[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(1): 97-101.
- [4] RAMANUJAM M, VENKATESWARLU D. Studies in Fluid Energy Grinding[J]. Powder Technology, 1969, 3(1):92-101.
- [5] TSUJI Y. Multi-scale Modeling of Dense Phase Gas-particle Flow [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (13): 3410-3418.
- [6] 张长森.粉体技术及设备[M].上海:华东理工大学出版社, 2007.
- [7] 周俊杰,徐国权,张华俊,等.FLUENT 工程技术与实例分析[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

(编辑 丁 罡)

(上接第 7 页)

进行有限元分析,得出其动态特性,并提出了改进意见,为涡旋压缩机动力学分析和结构改进设计提供了依据。同时也为其它轴类零部件的动态分析提供更加完备的参考,对于各种不同机床主轴,在分析时要考虑安装在主轴上的卡盘、支撑元件轴承等一系列元件对轴动态性能的影响,这样可以使分析的结果更加精确。

## 参考文献

- [1] 李凤宇,欧阳林子,陈仰贤,等.涡旋体加工质量的检测[J].中国机械工程,2002,29(24):2094-2096.
- [2] CAE 应用联盟,张岩. ANSYS Workbench 15.0 有限元分析[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [3] 胡萍,王珍,赵元海,等.基于模态分析的涡旋压缩机曲轴固有特性研究[J].压缩机技术,2007(6):5-7.
- [4] 余小玲,余宾宴,冯全科.大型活塞压缩机曲轴振动分

析-模态分析[J].压缩机技术,2011(2):10-12,23.

- [5] 刘振全,任俊士.涡旋压缩机的振动时域和频域分析[J].甘肃工业大学学报,2000,26(1):49-53.
- [6] 王永胜,胡青春.某空气压缩机曲轴的静力优化及模态分析[J].机械制造,2011,49(1):37-39.
- [7] 曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析:理论与应用[M].2版.天津:天津大学出版社,2014.
- [8] 张海杰,徐海利,王广辉,等.高速电主轴的模态分析[J].机械制造,2013,51(4):8-9.
- [9] 罗生梅,乔田忠.JY-5 数控铣床主轴动态特性分析[J].机械制造,2015,53(8):15-17.
- [10] 裴大明,冯平法,郁鼎文.基于有限元方法的主轴轴承跨距优化[J].机械设计与制造,2005(10):44-46.

(编辑 平 平)