

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.04.033

本文引用格式: 彭斌,董灏,李要红,等.基于CFD动网格的无油涡旋压缩机性能研究[J].机床与液压,2020,48(4):126-130.

PENG Bin ,DONG Hao ,LI Yaohong ,et al.Research on Performance of Oil-free Scroll Compressor Based on CFD Dynamic Mesh[J].Machine Tool & Hydraulics ,2020 ,48( 4) :126-130.

## 基于CFD动网格的无油涡旋压缩机性能研究

彭斌,董灏,李要红,赵生显

(兰州理工大学机电工程学院,甘肃兰州730050)

**摘要:** 无油涡旋压缩机的内部流场研究,对于提升无油涡旋压缩机的性能有着重要的影响。通过对无油涡旋压缩机的内部流场建立三维非定常CFD数值模拟,以空气作为工质,运用动网格技术对其腔内工质的流动规律和状态分布以及在不同电机转速驱动下无油涡旋压缩机的质量流量做了详细分析。分析表明:工质的质量流量随主轴转速的增大而增大;在压缩机工作过程中,随着主轴的转动,工质气体在工作腔内压力和温度均逐渐增大,且分布不均匀。

**关键词:** 无油涡旋压缩机; CFD; 动网格; 流场仿真

**中图分类号:** TH45

### Research on Performance of Oil-free Scroll Compressor Based on CFD Dynamic Mesh

PENG Bin ,DONG Hao ,LI Yaohong ,ZHAO Shengxian

(College of Mechano-Electronic Engineering ,Lanzhou University of Technology ,Lanzhou Gansu 730050 ,China)

**Abstract:** The study about the internal flow field of the oil-free scroll compressor has an important influence on the performance of the oil-free scroll compressor. A three-dimensional unsteady CFD numerical simulation of the internal flow field of an oil-free scroll compressor was established. Taking air as a working medium, dynamic mesh technology was applied to analyze the flow law and state distribution of the working fluid in the working chamber, and mass flow at different motor speeds. Analysis results show that the mass flow of the working fluid increases as the spindle speed up; during the operation of the compressor, as the main shaft rotates, the pressure and temperature of the working gas in the working chamber gradually increase and unevenly distributed.

**Keywords:** Oil-free scroll compressor; CFD; Dynamic mesh; Flow field simulation

### 0 前言

计算流体力学(CFD)是随着计算机技术发展而产生的一门学科,其实质是通过对描述流体流动方程的计算,得到目标在连续区域上的离散分布,在计算机上尽可能地模拟目标的运动状态。由于涡旋压缩机自身运转平稳,低噪声,在新能源汽车和空调领域中运用广泛<sup>[1-2]</sup>。刘振全<sup>[3]</sup>从型线、用途上对涡旋压缩机进行了全面的分析。目前,在压缩机的型线创新、热力学动力学研究以及密封性上,许多学者进行了大量的研究<sup>[4-7]</sup>。之前受限于CFD仿真计算对计算机性能的要求,对于整个流场区域的仿真并不多见。运用理论计算和实验分析,对于其内部流场特性的描述很难做到准确,但是工质在流场内的非定向流动可以在很大程度上影响流场内部压力以及温度,这对于无油涡旋压缩机的性能研究有着重要的参考价值。因此,通过模拟仿真得到其流场特性有着重大意义。

随着计算机技术的发展以及CFD动网格技术的应用,涡旋压缩机内部流场的仿真变为可能<sup>[8]</sup>。在其他类型压缩机方面,CFD技术得到了较早的应用。针对不同的蜗壳离心压缩机,XU和MÜLLER<sup>[9]</sup>运用该技术对其进行仿真模拟。但是,因为涡旋压缩机流场自身的复杂性,一些学者对流场进行二维化或只对单一腔体进行了仿真模拟,得出了一些成果。通过对不同型线构成的单一腔体进行仿真,李超等人<sup>[10]</sup>得到了其内部流场的分布情况。在将涡旋压缩机流场进行二维化处理,陈玉坤等<sup>[11]</sup>运用动网格技术对其进行了仿真模拟,发现并解释了内部流场的不均匀性。在结构优化方面,运用CFD技术对腔体进行仿真:罗辉<sup>[12]</sup>根据流场特点对涡旋压缩机型线进行了优化;邢恒远等<sup>[13]</sup>通过CFD技术对圆渐开线型线流场进行模拟,为型线的优化提供了理论依据,并通过CFD对两者流场进行对比,证明了优化后的型线更

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275226; 51675254); 甘肃省陇原青年创新人才计划

作者简介: 彭斌(1976—),男,博士,教授,专业方向为机械设计及理论。E-mail: dongh19911613@163.com。

加符合要求。肖根福等<sup>[14-15]</sup>运用 CFD 对涡旋压缩机吸气腔进行三维仿真,得到了其热力学特性。在无油涡旋压缩机研究方面,很多学者通过数学建模、模拟仿真以及实验验证也做了许多工作<sup>[16-17]</sup>。

本文作者主要针对无油涡旋压缩机完整的工作流场建立三维非常模拟仿真,运用动态网格,以空气作为工质气体,对无油涡旋压缩机在不同工况下的质量流量以及在工作过程中所受气体力做了详尽的分析,为其优化提供依据。

### 1 建立模型

本质上,CFD 技术是运用计算机技术,求解流体流动的偏微分方程组的技术。这其中大致包括流体力学、计算图形处理以及算法问题。在模拟过程中,根据遇到的不同问题,在模拟过程中也存在着差异,可根据不同的问题进行设置。总体而言,建立正确的数学及物理模型,选定合适于自身计算的求解算法以及最后对于计算结果的处理是 CFD 仿真计算的三个重要组成部分。

#### 1.1 几何模型

建立无油涡旋压缩机的几何模型至关重要,几何模型是数学模型的基础。本文作者使用的涡旋压缩机是新型无油涡旋压缩机,其齿头部分为双圆弧加直线修正,提高了齿头在高温高压工作环境下的强度。图 1 为涡旋压缩机的型线示意图,其结构参数见表 1。

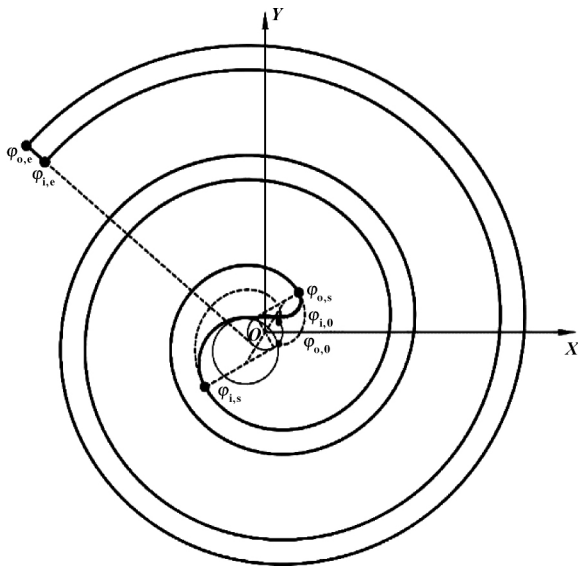


图 1 涡旋压缩机型线齿头修正

表 1 无油涡旋压缩机参数

参数	数值	参数	数值
$r_b / \text{mm}$	2.387	$\varphi_{i,p} / \text{rad}$	0
$h / \text{mm}$	20	$\varphi_{o,p} / \text{rad}$	-1.396 26
$t / \text{mm}$	3.333	$\varphi_{i,s} / \text{rad}$	3.141 5
$\varphi_e / \text{rad}$	17.73	$\varphi_{o,s} / \text{rad}$	0.3

### 1.2 物理模型与网格划分

无油涡旋压缩机在工作过程中,其内部流场存在流动与传热的耦合问题,故在建立控制方程时不仅需要考虑描述流动状态的质量、动量微分方程,还需满足热力学能量守恒以及传热方程,使仿真符合相应的物理定律。

无油涡旋压缩机在运转过程中,其工质处于高温高压中,环境复杂,存在着耦合。例如:工质在高速运转过程中由于被压缩发热,使其自身膨胀,或者在腔体内高速运动,产生不定向的扰流和回流。故工质在仿真过程中需符合有关的物理定律,其公式为

#### (1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

#### (2) 动量守恒方程

将流场内工质看作由多个单位体组成,而该方程描述了一个单位体上所受力总和是受动量与时间变化的影响。3 个坐标方向的守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

#### (3) 能量守恒方程

由物理学能量定律可知,一个物体的能量由内能、势能以及动能组成。无油涡旋压缩机内的工质气体在工作过程中也符合这一物理定律。现以温度  $T$  作为变量,可得到以下守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_r \quad (3)$$

在 SolidWorks 软件中通过已有几何模型建立无油涡旋压缩机工作流场的三维立体模型。然后导入 Workbench 中对模型进行进一步的分层处理,后再与 Meshing 模块关联,在该模块中划分网格。由于涡旋压缩机流场自身特殊的结构,为保证模拟计算的正确性和客观性,在划分腔体流场网格时,采用了 Sweep 方法,即扫略划法。网格划分如图 2 所示。整个流场由出入口管道和压缩机腔体所构成,由 780 000 个网格所构成,流场区域采用三角形扫略,最小间隙处网格为 4 层。为避免在计算过程中网格发生撕裂现象,采用 2.5D 网格,壁面为弹性光滑,在计算中采用网格的局部重构。为了在仿真中准确重现动盘的工作运动方式,采用 UDF 自行定义动涡旋盘的运动。

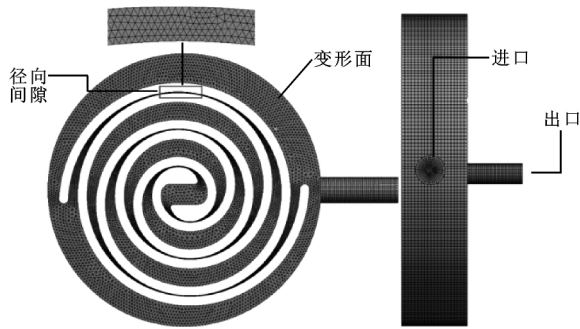


图 2 无油涡旋压缩机网格划分

1.3 计算方法

无油涡旋压缩机在工作过程中，由于自身转速快，气体在整个过程中处于高速状态，在流动过程中会产生不同程度的旋流，而且其气体流动为典型的非定常湍流，故而在 Fluent 软件中选择湍流流动的 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型描述工质气体在腔体内的运动。近壁面区采用标准壁面函数，且壁面网格无滑移。考虑到工作过程中的传热问题，该模型中工质的传热采用高阶二阶迎风模型，扩散项离散采用中心差分。在算法选择上，选择适合压力与速度耦合计算的 PISO 算法进行仿真计算。流体模型选择 RNG  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型，即：

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\rho\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\rho\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5)$$

1.4 参数设置

在设置边界条件时，充分考虑无油涡旋压缩机实际的工作状态和条件，将吸气及排气口分别设置为压力进口和压力出口，根据无油涡旋压缩机具体的工作条件设置吸气口和排气口的具体值。在吸气管道、压缩流场以及排气管道的重叠区域，采用交界面设置，其他边界部分的类型均为壁面。本文作者利用 Fluent 自带的工质库，选定无油涡旋压缩机内部流体为空气。无油涡旋压缩机由电机驱动，转速为 2 500 r/min。在计算过程中对吸气口及排气口进行质量流量检测，当残差曲线满足收敛条件，且质量流量满足理论计算得出的规律性变化，则认为仿真计算成功。无油涡旋压缩机模拟工况见表 2。

表 2 工况设置条件

参数	数值	参数	数值
入口压力/MPa	0.1	出口压力/MPa	0.8
入口温度/K	300	转速/(r · min <sup>-1</sup> )	2 500

2 工作过程分析

在表 2 的工况状态下，仿真计算无油涡旋压缩机

工作三周期后，得到其流域的压力、温度以及速度的大致分布，如图 3 所示。可以看出：在压缩机工作的过程中，随着主轴的转动，工质气体经过吸气腔、压缩腔以及中心腔，随着气体不断被压缩，工质的压力和温度都在逐步上升，且在同一腔体内部存在着分布不均匀的现象；由于啮合出腔体体积较小，故在此处流体速度达到腔体内的最大值；在排气过程中，由于体积变大且存在压差，气体流速不断增大。

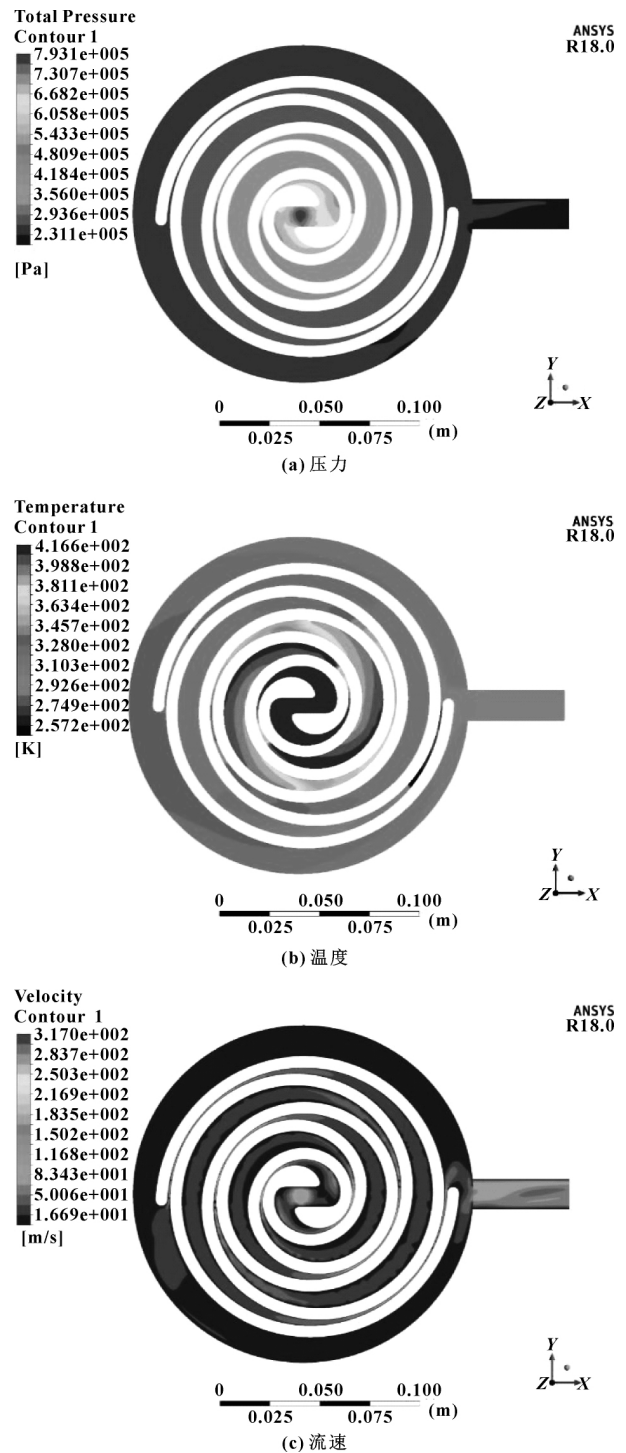


图 3 无油涡旋压缩机压力、温度以及速度云图

图 4 所示为无油涡旋压缩机在表 2 工况下, 吸气口及排气口的质量流量随时间的变化, 其中正值代表吸气质量, 负值代表排气质量。不难看出: 其质量流量呈周期性变化, 周期为 0.024 s, 该变化规律符合文献 [18] 中由数学模型得出的求解结果。图 4 (b) 为不同转速下无油涡旋压缩机工质进出口质量流量变化图, 不难看出, 在相同工况下转速与流量成正比。

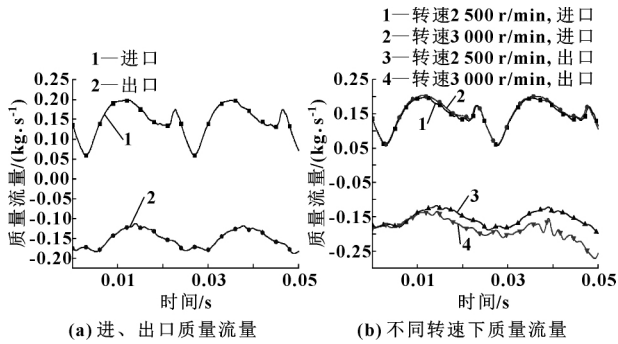


图 4 质量流量变化图

### 3 动力学分析

在研究无油涡旋压缩机的过程中, 其动力学分析对其性能有着重要研究意义。动力学分析主要是对动涡旋盘所受的径向力  $F_r$ 、轴向力  $F_a$ 、切向力  $F_t$  进行分析计算。同时, 除了上述所受力之外, 还受这 3 个力所产生的自转力矩  $M_r$ 、倾覆力矩  $M_o$  以及切向力矩  $M_t$ 。这 3 个力矩在无油涡旋压缩机工作过程中都会对其性能产生巨大影响, 故研究其规律意义重大。动涡旋盘气体力及力矩分析如图 5 所示。

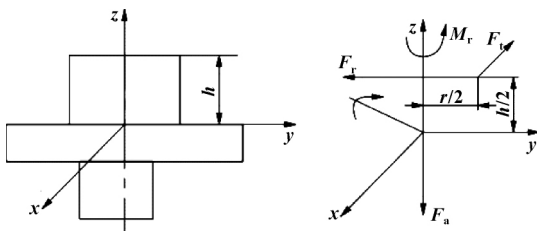


图 5 动涡旋盘气体力及力矩分析

Fluent 计算结束后, 用其自带后处理软件对动涡旋盘所受气体力进行求解, 各力和力矩的求解方程如下:

径向力:

$$F_r = \sum_{i=1}^n \left[ F_{y,i} \cos\left(\frac{\pi N}{30}t\right) + F_{x,i} \sin\left(\frac{\pi N}{30}t\right) \right] \quad (4)$$

$$\text{轴向力: } F_a = \sum_{i=1}^n F_{z,i} \quad (5)$$

切向力:

$$F_t = \sum_{i=1}^n \left[ F_{y,i} \cos\left(\frac{\pi N}{30}t\right) - F_{x,i} \sin\left(\frac{\pi N}{30}t\right) \right] \quad (6)$$

$$\text{自转力矩: } M_r = \frac{1}{2} R_o \sum_{i=1}^n F_{t,i} \quad (7)$$

倾覆力矩:

$$M_i = \left( \frac{1}{2} H + H' \right) \left[ \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n F_{t,i} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n F_{r,i} \right)^2} \right] \quad (8)$$

式中:  $n$  表示各受力面控制体单元数目;  $N$  为无油涡旋压缩机转速;  $F_{x,i}$  表示施加于涡旋齿壁面第  $i$  个单元面的气体力  $x$  方向分量;  $F_{y,i}$  表示施加于涡旋齿壁面第  $i$  个单元面的气体力  $y$  方向分量;  $F_{z,i}$  表示施加于涡旋盘盘面第  $i$  个单元面的  $z$  轴向气体力;  $R_o$  表示动涡旋齿转动半径, 即主轴偏心距。

图 6 为气体力计算的结果, 在 3 个力之中, 动涡旋盘所受到的轴向力最大, 峰值可达到 5 113.42 N, 其次是峰值达到 1 883.86 N 的切向力。通过对比可以得出: 轴向气体力相对于其他两个力变化较大; 轴向力与切向力的变化规律相似, 轴向力变化略大于切向力, 且幅值最大, 而径向力最小。因此可以得出径向力对于无油涡旋压缩机动盘的影响不大, 对于整机的性能影响可以忽略。

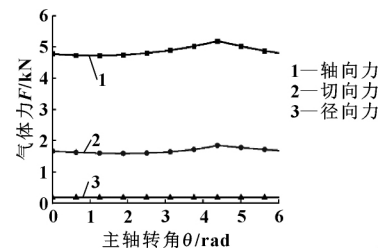


图 6 动涡旋盘气体力变化趋势

图 7 所示为倾覆力矩在一个工作周期内随主轴转角的变化曲线。可以看出: 倾覆力矩在主轴转角为 1.8 rad 时最小, 为 91.4 N·m, 当主轴转角为 4.3 rad 时, 倾覆力矩达到最大值 105.1 N·m。其中, 当倾覆力矩达到峰值, 这一时刻的转角为排气角, 即无油涡旋压缩机开始排气。图 8 为一个工作周期内, 自转力矩随主轴转角的变化, 从气体吸入到排出的过程中, 自转力矩在转角为 1.66 rad 时达到最小值, 为 4.66 N·m, 当压缩机开始排气时, 即转角为 4.3 rad 时, 自转力矩最大, 为 5.2 N·m。通过对比图 7 和图 8 两条曲线的峰谷值, 可以得出倾覆力矩在同一工作周期中的变化明显大于自转力矩, 因此在实际设计和优化无油涡旋压缩机时, 对于倾覆力矩产生的影响要格外注意。

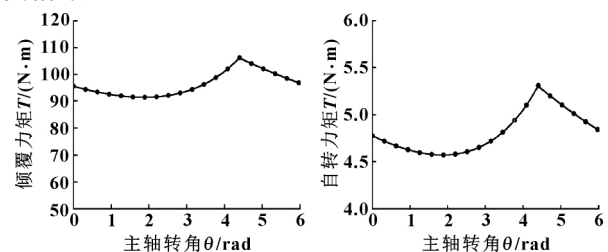


图 7 倾覆力矩的变化曲线

图 8 自转力矩的变化曲线

#### 4 结论

(1) 通过 CFD 仿真计算无油涡旋压缩机内部三维流场,得到了其温度、压力场的分布以及大致的变化规律。分析得出由于在实际运动过程中,动涡旋盘齿头会在特定时刻对吸气口及排气口产生遮挡,从而使流场内部气流产生大的扰流,致使气体流动不均匀,从而产生压力和温度的不均匀分布。

(2) 得到无油涡旋压缩机吸气口和排气口在工作周期内质量流量的变化规律,通过与相应数学模型求解结果的对比,验证了其正确性。对比不同转速的质量流量,得出随着转速的增高,吸气和排气口质量流量都相应增大,从而得出在相同工况下,转速越大,泄漏越小。

(3) 对无油涡旋压缩机动涡旋盘进行了受力分析,得出工作状态下的受力情况。其中倾覆力矩无论是峰值还是变化幅度都远高于自转力矩;轴向力远高于其他两个力。

#### 参考文献:

- [1] 中国能源长期发展战略研究项目组.中国能源中长期(2030—2050)发展战略研究:可再生能源卷[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 晏刚,高志刚,李冬,等.涡旋式制冷压缩机的生产现状与性能[C]//第十届全国冷(热)水机组与热泵技术研讨会论文集,2002:75-78.
- [3] 刘振全.涡旋式流体机械与涡旋压缩机[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [4] HAYANO M,NAGATOMO S,SAKATA H,et al.Performance Analysis of Scroll Compressor for Air Conditioner[C]//Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue,1986:836-871.
- [5] 彭斌,朱兵国.基于圆渐开线涡旋压缩机的几何模型研究[J].流体机械,2016,44(5):16-21.  
PENG B,ZHU B G.Investigation of the Geometrical Model for Scroll Compressor Based on Circle Involute[J].Fluid Machinery,2016,44(5):16-21.
- [6] PENG B,LEMORT V,LEGROS A,et al.Variable Thickness Scroll Compressor Performance Analysis: Part II: Dynamic Modeling and Model Validation[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E: Journal of Process Mechanical Engineering,2016,231(4):1989-1996.
- [7] JANG K,JEONG S.Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Mechanism in a Scroll Compressor[J].International Journal of Refrigeration,2006,29(5):744-753.
- [8] 傅德薰,马延文.计算流体力学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [9] XU C,MÜLLER M.Development and Design of a Centrifugal Compressor Volute[J].International Journal of Rotating Machinery,2005(3):190-196.
- [10] 李超,罗辉,张云豫.不同涡旋型线压缩腔流场的模拟分析[J].压缩机技术,2009,36(4):11-14.  
LI C,LUO H,ZHANG Y Y.A Simulation and Analysis of Different Scroll Profiles' Interior Flow Field[J].Compressor Technology,2009,36(4):11-14.
- [11] 陈玉坤,李海生,武涛,等.涡旋压缩机压缩腔内气体非稳态流动研究[J].流体机械,2006,44(10):46-50.  
CHEN Y K,LI H S,WU T,et al.Study on the Unsteady Flow of Gas in the Compressed Cavity of a Scroll Compressor[J].Fluid Machinery,2006,44(10):46-50.
- [12] 罗辉.涡旋式压缩机内部流场的模拟分析[D].兰州:兰州理工大学,2009.
- [13] 邢恒远,王珍,秦海杰.涡旋压缩机压缩腔流体的 CFD 模拟分析及应用[J].压缩机技术,2014,41(1):15-17.  
XING H Y,WANG Z,QIN H J.CFD Simulation and Application of Interior Flow Field for Scroll Compressor[J].Compressor Technology,2014,41(1):15-17.
- [14] 肖根福,刘国平,王俊亭,等.动网格在涡旋压缩机三维流场数值模拟中的应用[J].流体机械,2014,42(1):25-28.  
XIAO G F,LIU G P,WANG J T,et al.Three-dimensional Numerical Simulation for Transient Flow in a Scroll Compressor Using Dynamic Mesh Technique[J].Fluid Machinery,2014,42(1):25-28.
- [15] 肖根福,刘国平,王俊亭,等.基于动网格的涡旋压缩机内部流场数值模拟[J].机床与液压,2013,41(1):146-149.  
XIAO G F,LIU G P,WANG J T,et al.Numerical Simulation for Transient Flow in a Scroll Compressor Using Dynamic Mesh Technique[J].Machine Tool & Hydraulics,2013,41(1):146-149.
- [16] 彭斌,李要红,赵生显.无油涡旋压缩机涡旋盘的应变分析及实验验证[J].流体机械,2018,46(7):1-8.  
PENG B,LI Y H,ZHAO S X.Strain Analysis and Experimental Investigation of Oil-free Scroll Compressor Scroll Members[J].Fluid Machinery,2018,46(7):1-8.
- [17] 赵生显.新型无油涡旋压缩机的数学模型及试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
- [18] 张立群,罗友平,刘永波.涡旋压缩机工作特性的研究[J].流体机械,2003,31(3):1-5.  
ZHANG L Q,LUO Y P,LIU Y B.Research on Simulation of Scroll Compressor[J].Fluid Machinery,2003,31(3):1-5.

(责任编辑:张艳君)