DOI: 10.3901/JME.2019.24.197

双螺杆制冷压缩机工作过程的数值模拟*

黄浩^{1,2} 吴华根¹ 应雯¹ 张倍毓¹ 林侃隆¹ 熊保顺¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049;

2. 压缩机技术国家重点实验室 合肥 230001)

摘要: 双螺杆制冷压缩机由于其独特的优势已被广泛应用,但由于其复杂的转子结构及型线设计,对该类压缩机的整体性能的预测一般采用一维数值模拟或经验方式得到,但是该方法无法获得压缩机内部流体压力场和温度场的分布情况。根据试验用螺杆压缩机建立了三维模型,利用结构化动网格技术,通过CFD软件对双螺杆压缩机的内部流场进行了三维数值模拟,分析了流体在压缩机内部的流动及热力学参数分布状况,得到了压缩机内部压力场、温度场和速度场的分布规律。将三维数值模拟得到的 $P-V$ 指示图及压缩机宏观性能参数与试验结果进行对比分析,发现模拟结果与试验数据基本一致,部分负荷时误差较大,误差最大的是绝热效率,为2.58%。数值模拟能够准确预测双螺杆压缩机的性能,并为压缩机设计提供了新的方法。

关键词: 双螺杆制冷压缩机; CFD; 数值模拟; 热力学性能; $P-V$ 图

中图分类号: TH455

Research on Characteristics of Twin-screw Refrigeration Compressor

HUANG Hao^{1,2} WU Huagen¹ YING Wen¹ ZHANG Beiyu¹ LIN Kanlong¹ XIONG Baoshun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. State Key Laboratory of Compressor Technology, Hefei 230001)

Abstract: Twin-screw refrigeration compressors have been widely used due to their unique advantages, but owing to their complex rotor structure and profile design. The performance of twin-screw refrigeration compressors is generally predicted by one-dimensional numerical simulation or empirical methods, but this kind of method cannot obtain the distribution of the fluid pressure field and temperature field inside the compressor. A three-dimensional model is established based on the experimental screw compressor. The internal flow field of the twin-screw compressor is simulated by CFD software using the structured dynamic grid technology. The flow and thermodynamic parameters of the fluid inside the compressor are analyzed. The distribution of the internal pressure field, temperature field and velocity field of the compressor is obtained. Comparing the $P-V$ indicator diagram and the macroscopic performance parameters of the compressor obtained by three-dimensional numerical simulation with the experimental results, it is found that the simulation results are basically consistent with the experimental data. The error is large at part load, and the maximum error is the adiabatic efficiency, which is 2.58%. Numerical simulation can accurately predict the performance of twin-screw compressor and provide a new method for compressor design.

Key words: twin-screw refrigeration compressor; CFD; numerical simulation; thermodynamic performance; $P-V$ diagram

0 前言

双螺杆制冷压缩机相较于其他种类的压缩机具有结构简单、易损件少、运转平稳性好及适应性强的特点,在市场中占有很大的比例。对于双螺杆制

冷压缩机热力学性能的研究有助于优化压缩机的性能,并找到压缩机机组的最佳运行工况。转子型线是螺杆压缩机设计中最重要的一部分,良好的密封性和合理的力矩分配是转子型线设计的基本原则,接触线长度、封闭容积、齿间面积和泄漏三角形是用来衡量型线设计优劣的基本要素,也与压缩机的气流脉动和热力性能息息相关^[1]。

WU等^[2]研究了润滑油对双螺杆制冷压缩机性能的影响,通过数学模型和试验研究发现压缩机润

* 国家自然科学基金(50806055)和压缩机技术国家重点实验室(压缩机技术安徽省实验室)开放基金(SKJ-YSJ201805)资助项目。20190401收到初稿,20190930收到修改稿

滑油注油位置,注油量以及注油温度都会影响压缩机的性能。该研究为双螺杆制冷压缩机优化润滑油分配、提高效率提供了理论支持。HOU 等^[3]对不同工况下的转子轴向力进行了试验研究,并提出了平均压力模型和扇形压力模型两种计算转子端面轴向力的数学模型。研究结果表明扇形压力模型对转子轴向力的预测较为准确,并且转子端面轴向力的影响大于转子端面轴向力的影响。很多学者提出了双螺杆制冷压缩机工作过程的数学模型^[4-5],这些模型充分考虑了压缩机的多种泄漏途径、油气换热和功率损失等,能够有效地预测压缩机的性能。但是这些数学模型并不能得到压缩机内部流体流动的详细信息。

随着计算机技术的飞速发展,CFD 被广泛应用于压缩机性能的研究中,它不仅能够减少昂贵的试验费用,还能有效的减少开发时间,缩短开发周期。由于双螺杆压缩机的转子形状复杂,机器中存在非常小的间隙,这使得网格生成存在很大困难。KOVACEVIC 等^[6-7]介绍了一种先进的网格生成方法,开发了一种完全原创的边界自适应程序,可以适用任何转子的形状。该方法可以提高模拟计算的准确性,可以更好地预测压缩机的性能,使得此类机械的设计具有更低的发展成本。RANE 等^[8-9]讲述了一种新的生成了螺杆压缩机变形网格的代数技术,它具有代数方法和微分方法的优点。引入两个控制函数对初始代数分布进行正则化,极大地改善了网格单元的质量和分布,提高了网格节点的运动稳定性。

WILLIE 等^[10]在研究卡车上无油螺杆压缩机噪声源时,对压缩机的流场进行了模拟,但是其模拟的结果与试验结果有较高的误差,可能原因是其未进行网格无关性验证,网格数量不足。RANE 等^[11]研究了一台双螺杆压缩机,发现网格在沿转子型线周向的细化直接影响了质量流量的预测。DING 和 KIM 等^[12-13]利用不同的 CFD 软件模拟了喷油对压缩机性能的影响,喷油能够有效的降低压缩机的排气温度,提高压缩机的性能。ARJENEH 等^[14]将 CFD 技术应用于变螺距和变转子端面的螺杆压缩机研究中,通过改变转子的形状,可以改善压缩机的压缩特性,实现压缩机内部压力快速上升。在相同的压力比下,变螺距和变截面转子实现了更大的排气面积,而且变螺距转子在高压区域能够有效地减小密封线长度,从而减少泄漏。

BYEON 等^[15]利用重叠网格技术模拟了无油空气压缩机的工作过程,通过试验得到了压缩机的绝热效率和容积效率,模拟结果和试验结果吻合良好。ARJENEH 等^[14]利用 CFD 方法研究了螺杆压缩机进气腔内局部压力的变化规律,并讲述了相关试

验的测量方法,验证了 CFD 技术在螺杆机械研究中的应用。很多学者研究了 CFD 求解器对双螺杆压缩机性能预测的影响,将不同 CFD 模型计算得到的性能预测结果与试验结果进行对比,两种不同求解器得到的结果与试验结果存在差异,为 CFD 求解器的选择提供了参考依据。

利用 CFD 技术对双螺杆制冷压缩机的工作过程进行了三维模拟,分析了压缩机内部流体的流动特性,得到了压缩机内部压力、速度、温度的分布规律。模拟得到的压缩机的容积效率、绝热效率和输入功率等结果与与试验数据吻合良好,证明了本模型的正确性

1 几何模型建立与网格划分

双螺杆压缩机的工作过程非常复杂,为了方便模拟,体现压缩机的工作过程,本次研究需要把压缩机的流体域模型分为三个部分,分别为进气口流体域、封闭容积、排气口流体域。由于模型被分为三个流体域,在计算过程中三者之间需要连通,从而进行信息和能量的交换,因此三者的接触面属性需要设置为交界面(Interface),交界面重叠相交的部分即为交界面连通部分。图 1 为试验用双螺杆压缩机的控制容积图。

图 1 试验用双螺杆压缩机的控制容积图

进出口流体域采用四面体网格和六面体网格结合的非结构化网格划分,如图 2a 和 2b 所示。为了保证计算时数值插值的准确性,必须保证进出口流体域与转子腔体的交界面网格尺寸基本一致,设置交界面的网格尺寸为 1.32 mm,最终生成的网格数量为 1 329 899,整体网格扭曲率低于 0.8,质量满足要求,可以用于计算。

由于双螺杆压缩机工作腔内几何结构复杂,内部流体区域随着转子转动在不停地发生变化,同时又存在极小的间隙,这就使得对网格的要求极为苛

刻，需要高质量、快速的网格生成工具，来满足求解器准确地预测主流流动、边界层流动和间隙内的流动，一般的网格划分软件无法满足要求。利用 Twinmesh 生成工作腔内流体域网格，该工具是一个针对容积式旋转机械内部流动仿真的网格生成工具，可以根据阴阳转子型线自动生成高质量的六面体网格。在 Twinmesh 中可以设置各种不同的参数来生成网格，经过网格无关性验证后，最终转子腔体内部流体域生成六面体网格数量为 5 019 800，二维网格如图 2c 所示。

图 2 不同流体域网格划分

2 模拟设置

2.1 边界条件设置

压缩机内制冷剂为可压缩流体，湍流模型采用剪切压力传输(Shear stress transport, SST) $k-w$ 模型，该模型综合了 $k-w$ 模型在近壁区计算的优点和 $k-e$ 模型在远场计算的优点，适用范围广泛。传热模型采用 Total Energy 模型，计算对流换热及热传导，并且考虑的流体流动带来的热量变化，适合高速流动及可压缩流动的传热计算。制冷剂选择 R134a，将试验获取的进出口温度和压力作为模拟的进出口边界条件，如表 1 所示。由于 R134a 的排气温度较低，油不进行油冷，模拟时不考虑油的换热。转子转速为 2 960 r/min，这里通过设置阳转子每转一度的时间为时间步长，来达到设置转速的目的。

2.2 网格无关性验证

由于网格数量会影响模拟的结果，对 Twinmesh 中不同参数设置划分的网格进行模拟分析，图 3 为

表 1 CFD 仿真的边界条件

参数	测量值
进口压力/MPa	0.285
进口温度/K	278
出口压力/MPa	1.515
出口温度/K	355.4
体积流量/(m ³ /min)	3.25

试验用压缩机控制容积网格示意图，不同参数下的模拟结果如表 2 所示，其中时间步长用阳转子转过的度数表示。

图 3 试验用压缩机控制容积网格示意图

表 2 网格无关性验证

	周向节点数	径向节点数	轴向节点数	体积流量/(m ³ /min)	网格总数
Case1	360	30	125	2.633	3 673 144
Case2	720	20	125	2.807	4 361 344
Case3	720	30	125	2.837	6 302 644
Case4	720	20	200	3.248	6 518 344
Case5	720	20	250	3.251	8 028 244

图 4 为不同 Case 的 $P-\theta$ 图。从表 2 中可以看出转子型线周向节点数和轴向网格数对压缩机流量的影响很大，径向节点数对压缩机流量影响较小。并且网格数量对体流量的影响最大，对压缩机的压力影响较小，但是容积流量是压缩机非常重要的性能参数之一，因此，应以容积流量作为模拟结果是否准确的依据。考虑到计算资源的成本，采用 Case4 的网格进行模拟计算。

3 试验

为了验证螺杆制冷压缩机 CFD 模拟的正确性，在阴转子一个齿槽内靠近排气端的位置安装一个微

图 4 不同 Case 的 $P-\theta$ 图

型压力传感器,能够监测到螺杆压缩机一个工作周期内的压力信号,由此可以得到压缩机工作过程中的 $P-V$ 图。改装后的阴转子如图 5 所示,阴转子齿槽内径向安装的微型压力传感器采集该齿槽内的压力信号,该压力信号通过位于阴转子转轴及信号传输轴轴内的信号线引出,经处理后得到 $P-V$ 图。

图 5 改装后的阴转子

4 结果分析与讨论

双螺杆压缩机阴阳转子高速旋转压缩制冷剂,对制冷剂做工,使制冷剂气体获得能量,在转子的作用下,制冷剂气体的压力会得到提高。压缩机内部的压力分布对于压缩机的效率和工作性能都有很大的影响。通过数值模拟研究转子表面的压力场分布,从而对制冷剂气体压力在流道内部的分布及变化情况进行详细的分析。

转子整体压力分布比较直观地显示出压缩机流道内部的压力分布情况。从图 6 中可以看出,不同角度下压缩机流道内部的压力变化情况,由于本次模拟使用的是 5-6 齿型线,所以每转过 72° ,压力会呈现周期性变化,从图中可以清楚地观察到这些变化, 0° 到 72° 的压力分布如图所示。而且从转子的吸气端到排气端,压力沿转子螺旋面逐渐增大,从压缩机的吸气口到排气口各基元容积内的压力逐渐增大,排气口封闭容积内的压力最大,反映出压缩机强制输气的特征,这与整机实际的压力分布情

况相一致。而且,不同的齿间容积之间压力存在明显的分界线,产生此现象说明阴阳转子在啮合过程中,两者之间存在的接触线起到了密封的作用,防止制冷剂从高压区向低压区泄漏,而且说明齿顶间隙设置合理,齿顶间隙无大量泄漏。

图 6 压缩机内部压力分布图

在压缩机内部,气温升高主要由以下几个部分产生的,即制冷剂气体与转子以及壳体摩擦产生的热量,转子对制冷剂气体压缩使其能量增加产生的热量,以及流动损失,冲击损失等。图 7 是压缩机内部整体的温度分布图,从图中可以看出,沿转子轴向方向,温度逐渐升高,且靠近排气口的温度最高,说明在压缩机工作过程中,内部温度在转子后半段接近于排气口处较高,排气口处温度明显大于吸气口处,与实际情况相符合,该研究可以为压缩机喷油孔口的位置设计提供参考。

图 7 压缩机内部温度分布图

由于阴阳转子之间存在啮合间隙,在转子高速旋

转的过程中, 制冷剂气体通过转子啮合间隙处产生制冷剂的逆流, 使制冷剂从高压区向低压区泄漏, 转子齿间容积的压差越大这种由于间隙引起的泄漏越明显, 且间隙处的流体速度远大于齿槽内流体的速度。图 8 为压缩机的齿间间隙泄漏速度矢量图, 可以看出在端面泄漏中, 齿槽内的制冷剂流速几乎没有变化, 不同齿槽间的泄漏较为明显, 由排气端直接向吸气端的泄漏速度最大。压缩机内制冷剂的泄漏主要是由不同齿槽间压力不同引起的, 泄漏速度的分布规律与压差正相关。制冷剂泄漏会改变压缩机内部气流的流动状态, 并且会大大降低压缩机的效率, 因此合理控制双螺杆压缩机的泄漏间隙显得尤为必要。

图 8 压缩机齿间间隙泄漏速度矢量图

从两个方面来验证 CFD 模型的正确性, 一是通过比较表征螺杆制冷压缩机微观工作过程的 $P-V$ 图, 压缩机工作腔中的压力是随着阳转子角度不断变化的, 是构建 $P-V$ 图的重要参数, 如果通过 CFD 计算得到的 $P-V$ 图能够与试验测得的 $P-V$ 图吻合较好, 则表明本 CFD 计算模型对压缩机性能的预测是可信的。二是通过比较压缩机的容积效率、绝热效率和输入功率等宏观参数。

图 9 给出了螺杆制冷压缩机部分负荷和满负荷工况下的 $P-V$ 图, 从图中可以看出吸气和压缩过程中, 通过 CFD 计算得到的压力变化曲线与试验测得的压力变化曲线吻合较好, 在排气过程中, CFD 计算模型未能精确地反映出实际过程, 这可能是因为排气过程中存在较大的压力脉动, 排气腔内的压力波动较大, 存在一定的误差。

从图 9 部分负荷下的 $P-V$ 图中可以看出, 压缩过程的开始点被延迟, 压缩曲线变得陡峭, 排气时间变短。这是由于在压缩过程初期, 压缩机滑阀打开, 使吸气腔与压缩腔联通, 从而导致了压缩过程延后。这会使压缩机的排气压力略微低于满负荷时压缩机的排气压力, 由于径向排气孔口的变化, 部分负荷时压缩机的排气时间也略小于满负荷时压缩机的排气时间。

(a) 部分负荷下压缩机 $P-V$ 图比较 (b) 满负荷下压缩机 $P-V$ 图比较图 9 不同工况下压缩机 $P-V$ 图比较

在 CFD 计算中可以监测到压缩机的指示功率分别为 22.749 8 kW 和 34.269 1 kW, 取电机效率为 0.95, 机械效率为 0.91, 计算得到压缩机的输入功率分别为 26.315 6 kW 和 39.640 4 kW, 图 10 为两种工况下压缩机宏观性能的比较, 从表中可以看出通过 CFD 计算的压缩机的容积效率、绝热效率和指示功率都与试验测得的数据吻合较好。

图 10 不同工况下压缩机性能比较

在满负荷工况下, 通过 CFD 计算得到的压缩机宏观性能与试验结果误差小于 1%。在部分负荷工况下, CFD 计算得到的输入功率和绝热效率的误差较大, 但小于 3%。两种工况的结果都在误差允许

的范围内。

通过以上 CFD 计算结果与试验结果的对比,充分说明了 CFD 计算模型的准确性,可以正确描述压缩机的宏观及微观工作过程,可信度较高。

5 结论

完成了双螺杆制冷压缩机内部流场的几何建模和网格划分,利用专业流体分析软件 CFX 对双螺杆压缩机内部流场进行了数值模拟,得到了压缩机内部流场的流动特性。通过模拟,将压缩机内部的压力、温度、泄漏间隙的速度等分布规律可视化。可以清楚观察到压缩机内部不同的基元容积内压力沿轴向逐渐升高,阴阳转子接触线处压力最低,可能是由于此处泄漏速度较大,流速太高,导致压力过低。从压缩机的吸气口到排气口制冷剂温度得到了大幅度提升,在靠近排气口处温度最高,排气温度、压力等参数与试验数据接近。压缩机间隙泄漏速度远大于齿槽内制冷剂的流速,从高压区向低压区的泄漏最明显,因此在压缩机的设计过程中应尽量减少各种泄漏间隙。

通过试验,获得了不同负荷工况下双螺杆制冷压缩机的 $P-V$ 图,测试了压缩机的输入功率、容积效率和绝热效率等宏观性能。通过比较 CFD 计算结果与试验结果,可以发现 CFD 模型能够准确地反映出双螺杆压缩机微观工作过程,为双螺杆制冷压缩机的设计和优化提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] HAUSER J, BRÜMMER A. Geometrical abstraction of screw compressors for thermodynamic optimization[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(6): 1399-1406.
- [2] WU X, XING Z, HE Z, et al. Effects of lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 340-351.
- [3] HOU F, ZHAO Z, YU Z, et al. Experimental study of the axial force on the rotors in a twin-screw refrigeration compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 75: 155-163.
- [4] GIUFFRIDA A. A semi-empirical method for assessing the performance of an open-drive screw refrigeration compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 813-823.
- [5] WU Huage, XING Ziwen, SHU Pengcheng. Theoretical and experimental study on indicator diagram of twin screw refrigeration compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 331-338.
- [6] KOVACEVIC A. Boundary adaptation in grid generation for CFD analysis of screw compressors[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 64(3): 401-426.
- [7] KOVACEVIC A, STOSIC N, SMITH I. Grid generation of screw machine geometry[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] RANE S, KOVACEVIC A. Algebraic generation of single domain computational grid for twin screw machines. Part I. Implementation[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 107: 38-50.
- [9] RANE S, KOVACEVIC A. Application of numerical grid generation for improved CFD analysis of multiphase screw machines[C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, September 11-13, 2017, City University of London, London: 2017: 232.
- [10] WILLIE J. Use of CFD to predict trapped gas excitation as source of vibration and noise in screw compressors[C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, September 11-13, 2017, City University of London, London: 2017: 232.
- [11] RANE S, KOVACEVIC A, STOSIC N, et al. Deforming grid generation and CFD analysis of variable geometry screw compressors[J]. Computers & Fluids, 2014, 99: 124-141.
- [12] DING H, JIANG Y. CFD simulation of a screw compressor with oil injection[C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, September 11-13, 2017, City University of London, London: 2017: 232.
- [13] KIM Y J, BYEON S S, LEE J Y. Numerical analysis on the flow characteristics of oil-injected screw air compressor[C]// 2014 ISFMFE - 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering. IET Digital Library, October 22-25, 2014, Wuhan, China. IET, 2014.
- [14] ARJENEH M, KOVACEVIC A, RANE S, et al. Numerical and experimental investigation of pressure losses at suction of a twin screw compressor[C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, September 7-9, 2015, London: 2015: 90.
- [15] BYEON S S, LEE J Y, KIM Y J. Performance characteristics of a 4×6 oil-free twin-screw compressor [J]. Energies, 2017, 10(7): 945.

作者简介: 黄浩(通信作者),男,1993年出生。主要研究方向为双螺杆压缩机、膨胀机的数值模拟。
E-mail: xjhuanghao@stu.xjtu.edu.cn