

# The Research Progress of Numerical Simulation for Reciprocating Compressor Valve

Qin Zhang, Manlai Zhang, Zhihong Zhou

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei  
Email: [freemessage@126.com](mailto:freemessage@126.com)

Received: Jan. 28<sup>th</sup>, 2015; accepted: Feb. 12<sup>th</sup>, 2015; published: Feb. 15<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The research progress and application of numerical simulation for reciprocating compressor valve are reviewed in this paper. It shows that the numerical simulation of flow field inner valve is propitious to reveal the spatial distribution pattern of multi-physics field at different times, and the valve can be optimized through comparing several flow fields of different structures. Additionally, it is important to make some efforts on improving the multi-field coupling theory and simulation accuracy for the further development of reciprocating compressor.

## Keywords

Valve, Compressor, Numerical Simulation, Multi-Physics Field

---

## 往复式压缩机气阀数值模拟研究进展

张 琴, 张慢来, 周志宏

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州  
Email: [freemessage@126.com](mailto:freemessage@126.com)

收稿日期: 2015年1月28日; 录用日期: 2015年2月12日; 发布日期: 2015年2月15日

---

## 摘 要

对往复式压缩机气阀的数值模拟研究进展进行了综述。通过分析发现: 随着计算流体动力学学科的不断

发展,应用CFD方法模拟气阀内流场对于了解多物理场随空间、时间的变化具有显著优势,根据内流场特点改进结构成为CFD模拟的应用方向,需要在完善多场耦合理论和提高模拟精度方面进一步开展研究。

## 关键词

气阀, 压缩机, 数值模拟, 多物理场

## 1. 引言

往复式压缩机是一种常见的气体增压设备,广泛应用于动力、化工、制冷等领域。而气阀作为压缩机的重要组成部分之一,起着控制气体进出压缩机的作用,对气体压缩程度和压缩机性能起着至关重要的作用。然而,在实际应用中,压缩机还存在阀片启闭不及时、颤振和撞击等问题。上述问题的存在促使人们对压缩机气阀展开研究。

## 2. CFD 数值模拟进展

自上世纪 50 年代开始,往复式压缩机的热力计算都采用气阀理论进行相关结构的设计计算。该理论以理想气体的一元绝热流动假设为前提,建立描述阀片运动和汽缸压力比的方程组。实践表明,该理论适用于气阀结构的初步设计,但也存在许多局限性和不足,主要表现为:1) 一维假设忽略了汽缸内压力、温度的差异性,无法得到温度随曲柄转角的变化;2) 由于忽略了阀隙的流动细节,该理论对于改进气阀结构的指导作用不大。

随着计算流体力学(CFD)学科在上世纪 80 年代后的快速发展,应用 CFD 方法模拟热力设备的工作过程成为可能。分析热力设备可以发现,他们具有共同的显著特点,即气体温度场、流场和运动部件的运动相互耦合。对于往复式压缩机的气阀,各物理场互相影响,紧密联系,其分布特点反映了气阀结构与运行参数的匹配程度,分析多场的耦合特点成为深入分析其热力过程的关键。在 1994 年, Cyklis [1] 对往复式压缩机阀隙的二维稳态流场进行了 CFD 数值模拟,针对阀片的不同开度,建立了不同的二维轴对称计算模型。在此基础上,验证 CFD 数值模拟在压缩机气阀中的可行性及提高 CFD 数值计算的精度是研究的重点,主要通过引进实际气体的状态方程和高级紊流模型来实现。

A. P. Peskin [2] 于 1999 年研究了不同气体状态方程对往复式压缩机数值模拟结果的影响,引进了四种气体状态方程,亥姆霍兹能量状态方程式最复杂,计算的密度、焓值最准确,在压力不太高时采用第二维里系数的维里方程产生的计算误差仅百分之几,但压力较高时,引起的误差与理想气体方程相当,P-R 方程计算误差更大,密度值高达 6%,焓值在 5% 和 15% 之间,理想气体状态方程与亥姆霍兹方程相比,各计算数据中排气温度的差别最大。自 1999 年开始,针对阀隙的低雷诺数紊流流场进行了相关研究,Pérez-Segarra 等人[3]分别应用 RANS k-C 和 k-w 双方程紊流模型进行了数值模拟,Rovaris 等人[4]对雷诺数为  $2.5 \times 10^4$  的紊流进行了 LES 大涡模拟,而 Colaciti 等人[5]应用 RANS 紊流模型模拟了马赫数接近 0.2 的高雷诺数( $1.6 \times 10^6$ )流场。随着计算机的进一步发展,J. Rigola 等人[6]在 2012 年开始应用 LES 大涡模型对低雷诺数流动( $3 \times 10^5$ )进行数值模拟,分析了气体压缩性对模拟结果的影响,认为入口马赫数为 0.1 时,流体的压缩性可以忽略不计,但马赫数达到 0.3 时,必须考虑压缩性的影响。

提高往复式压缩机 CFD 模拟准确性的另外一项重要工作是改进模拟方法,即从二维发展到三维、建立复杂流道模型并改进网格质量,应用动网格技术。在 2005 年,Roland Aigner [7]用数值模拟方法研究了阀片的动态性能和压缩机内的压力脉动,比较了二维、三维和根据压缩机厂家经验开发的准一维模型的计算结果,认为应用商业化软件 FLUENT 6.2 进行数值模拟得到的二维计算结果与实测值最接近,但

计算精度与网格大小、离散式精度紧密相关，三维模拟时由于网格太多，计算两周也未收敛。准一维模型考虑了气缸内的压力脉动，描绘的气体流动特点、压力分布规律和阀片运动基本可满足工程精度要求。Yogesh V. Birari 等人[8]利用 CFD 方法设计和改进了一台往复式制冷压缩机，确定了由定子、转子、排气管、吸液管、吸气消声器和上盖组成的计算区域，在忽略热辐射，假设制冷剂不可压缩、稳定流动的条件下，进行结构化、块状结构化、非结构化网格划分，然后设置边界条件，求解，获得热力场，显示两种工质的温度分布，与实验数据相比，最大误差仅 5%；计算得到进排气通道压降，与实验比较吻合较好，优化了进排气通道结构；用动网格技术模拟了压缩过程，计算区域包括余隙容积在内的整个气缸容积，得到活塞运动参数。CFD 技术的应用，大大缩短了实验时间，与实验结果比较，验证了模拟的正确性。Akira Nakano 等人[9]研究了 CFD 方法在改变往复式压缩机吸气消音器压力、提高制冷量和制冷效率中的应用，模拟过程分为两个阶段，首先采用转移矩阵法计算出存在进气阀片振动时的缸内压力变化，然后将工质视为三元非稳定可压缩粘性流体，以前面计算的缸内压力为边界条件，应用 FLUENT 分析吸气消音器中的压力变化，从而优化制冷剂的质量流量，降低吸气消音器中的热量损失和压力损失。2010 年，Raimund Almbauer 等人[10]运用计算流体力学方法对往复式压缩机的热力过程进行二维数值模拟，通过比较不同结构的气缸压力分布，改进了压缩机结构，认为 CFD 和有限元方法(FEM)是进行热力设备优化设计的有效快速工。同一年，Kenji Kinjo 等人[11]运用 CFD 方法对一台直径 20.6 mm、气缸行程 18 mm、曲轴转速 3000 rpm、压缩比为 10 的往复式压缩机进行了数值计算，建立笛卡尔网格模型，运用虚流量法，模拟了往复式压缩机的工作过程，获得活塞运动引起的压缩腔内气体流动规律以及由气流推力引起的簧片阀片开启和关闭规律，比较计算结果与实验数据，验证了流-固耦合模拟的有效性。2012 年，Guido Pratelli [12]等人对往复式压缩机的整体模型进行了稳态的 CFD 模拟数值，该模型包含 16 个气阀、气缸头，气阀减荷器，计算的缸内 P-V 分布与测量数据吻合较好，Hiteshkumar MISTRY 等人[13]建立了簧片阀的三元瞬态计算模型，弹性簧片分别按悬臂梁和圆盘进行处理，运用 CFD 对含有压力脉冲装置的压缩机工作过程进行数值模拟，与实测的压力曲线相比，按悬臂梁计算的结果具有更好的吻合性。

21 世纪以来，数值模拟得到广泛应用。辽宁石油化工大学赵斌采用 CFD 方法对压缩机气阀的内流场进行仿真计算[14]，分析了气阀内的速度场和压力场分布特点。广西大学卢朝霞等人运用有限元理论分析了往复式压缩机环状阀片与升程限制器及阀座正碰撞与倾侧碰撞产生的冲击应力[15]，北京化工大学诊断与自愈过程研究中心武炳等人运用 CFD 方法对往复式压缩机进气阀的受力进行了数值计算[16]，通过建立不同开度的进气阀和气缸模型进行流场模拟，分析了阀片受气体力与阀片开启高度的关系。

### 3. 结语

当前，往复式压缩机的相关研究主要集中在气阀阀片运动规律的理论计算、气阀弹簧参数的合理设计方面，对于压缩机流场、温度场、阀片运动的耦合数值计算研究不多。虽然在压缩机的 CFD 数值计算方面有些研究，但大多限于二维计算，对计算模型也作了较多简化，不能准确地模拟压缩机的实际工作过程。压缩机的工作过程具有显著的流-热-固多场耦合特点，进行多场耦合计算是目前研究的重点问题之一。CFD 广泛应用于压缩机的数值模拟，成为提高压缩机设计效率的有效工具，随着 CFD 模拟技术的发展，对压缩机内流场进行三维动态模拟是当前和今后的发展趋势，将为深入分析气阀工作规律提供很好的基础。

### 参考文献 (References)

- [1] Cyklis, P. (1994) CFD simulation of the flow through reciprocating compressor self-acting valves. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 17-21 July 1990, 427-432.
- [2] Peskin, A.P. (1999) The effects of different property models in a computational fluid dynamics simulation of a reci-

- procating compressor. *International Journal of Thermophysics*, **20**, 175-185.
- [3] Pérez-Segarra, C.D., Cadafalch, J., Rigola, J. and Oliva, A. (1999) Numerical study of turbulent fluid flow through valves. *International Conference on Compressors and Their Systems*, C542/021/99, London, 13-15 September 1999, 736-743.
- [4] Rovaris, J.B. and Deschamps, C.J. (2006) Large eddy simulation applied to reciprocating compressors. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **28**, 208-215.
- [5] Colaciti, A.K., Valdés ópez, L.M., Navarro, H.A. and Cabezas-Gómez, L. (2007) Numerical simulation of a radial diffuser turbulent airflow. *Applied Mathematics and Computation*, **189**, 1491-1504.
- [6] Rigola, J., Lehmkuhl Barba, O., Ventosa, J., Pérez Segarra, C.D. and Oliva Llena, A. (2012) Numerical simulation of the turbulent fluid flow through valves based on low mach models. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 16-19 July 2012, 1375-1382.
- [7] Aigner, R., Meyer, G. and Steinrück, H. (2005) Valve dynamics and internal waves in a reciprocating compressor. *4th Conference of the EFRC*, Antwerp, 9-10 June 2005, 1275-1283.
- [8] Birari, Y.V., Gosavi, S.S. and Jorwekar, P.P. (2006) Use of CFD in design and development of R404A reciprocating compressor. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 17-20 July 2006, 72-78.
- [9] Nakano, A. and Kinjo, K. (2008) CFD applications for development of reciprocating compressor. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 17-20 July 2006, 1326-1333.
- [10] Kinjo, K., Nakano, A., Hikichi, T. and Morinishi, K. (2010) Study of CFD considering valve behavior in reciprocating compressor. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 12-15 July 2010, 1256-1263.
- [11] Almbauer, R., Lang, W., Nagy, D. and Berger, E. (2010) Application of computational fluid dynamics for the thermodynamic development of a new generation of hermetic reciprocating compressor. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 12-15 July 2010, 1230-1236.
- [12] Pratelli, G., et al. (2012) Valve dynamics and internal waves in a reciprocating compressor. *8th EFRC Conference*, Budapest, 17-20 May 2012, 1042-1050.
- [13] Mistry, H., Bhakta, A., Dhar, S., Bahadur, V. and Dey, S. (2012) Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue, 16-19 July 2012, 1210-1215.
- [14] 赵斌 (2007) 基于 CFD 的气阀内气体流动规律模拟. *石油化工设备*, **6**, 66-68.
- [15] 卢朝霞, 王玉鹏, 张增营, 潘树林, 梁景, 孙建华 (2008) 往复式压缩机环状阀工作过程冲击应力分析. *流体机械*, **11**, 11-16.
- [16] 武炳, 江志农 (2011) 往复式压缩机气阀受力的 CFD 分析. *压缩机技术*, **4**, 24-26.



汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

