

双螺杆压缩机 CFD 仿真分析及实验验证

CFD simulation analysis and experimental verification of twin screw compressor

龙 骥^{1,2} 何雪明^{1,2} 姜振钢^{1,2}

LONG Ji^{1,2} HE Xue-ming^{1,2} JIANG Zhen-gang^{1,2}

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:针对双螺杆压缩机流体域形状复杂并随时间变化的特点,运用 STAR CCM+ 软件进行计算流体动力学(CFD)分析,并搭建试验平台验证分析结果的准确性。通过对比仿真监测点和与之相对应的试验实测点的压力,两者在压力值和压力波动周期等方面具有较好的一致性,验证了 CFD 分析结果的可信度。

关键词:双螺杆压缩机; CFD; 实验验证

Abstract: In view of the complex and time changing characteristics of the fluid domain in the twin screw compressor, and in order to study its performance characteristics in detail, used STAR CCM+ software to do the computational fluid dynamics (CFD) analysis, and the experimental platform was built to verify the accuracy of the simulation results. By comparing the pressure values of the simulated monitoring points and the experimental measured points corresponding to them, both of them have good consistency in the pressure value and the period of pressure fluctuation.

Keywords: twin screw compressor; CFD; experimental verification

双螺杆压缩机具有可靠性高,操作维护方便、动力平衡好等优点,被广泛应用于制冷^[1]、食品^[2-3]等工业部门日常生产过程中,如易拉罐、饮料瓶的清洗和原料搅拌、发酵等^[4-5]。双螺杆压缩机具有 2 个结构特殊的转子,转子与机壳构成了一个复杂的空间,转子带动腔体内部的空气转动并完成压缩。其内部的气体流场是一个典型的三维非稳态流场^[6],此外,内部流体的流场特性还受到吸、排气孔口的形状^[7]、位置以及主机机壳结构等其他因素的影响,通过一般

方法研究压缩机内部的特性,如流速、温度等,具有一定的难度,而采用 CFD 方法对双螺杆压缩机进行仿真分析,可以有效地提高设计效率。CFD 计算将原本连续的物理量场用有限个离散点的变量值代替,按照一定规则建立离散点变量之间的关系方程并求解出场变量的近似解^[8-9],为解决通常双螺杆压缩机流体域采用非结构化网格计算无法获得一个完全守恒解决方案的问题,网格划分时采用多个软件对流体域进行混合处理的方式,而且该法可以克服以往 Fluent 动网格计算时易出错和为方便计算进行人为放大阴阳转子间间隙的问题,提高了仿真结果的可信度^[10]。为了证明 CFD 分析的有效性,需要搭建压力测试平台,通过对比试验与仿真的数据,验证分析计算结果的真实有效性。

1 双螺杆压缩机的基本原理

双螺杆压缩机是一种做回转运动的容积式气体压缩机械,随着螺杆转子的转动,阴阳转子间的齿间容积沿转子轴线从吸气端运动到排气端,且齿间容积由小到大再变小,发生周期性的变化,完成吸气、压缩和排气过程^[11]。

2 流体动力学仿真

2.1 建立流体模型

双螺杆压缩机工作时,工作腔内的气体被转子和机壳封闭,随着转子的转动,每一个工作腔内的气体都沿着轴向输送并被压缩,要模拟这一过程,则需利用已知的吸、排气口参数以及阴阳转子型线数据分别建立进气腔、排气腔和工作腔的流体模型,组合成完整的 CFD 流体模型。利用三维建模软件建立如图 1 所示的双螺杆压缩机流体模型。流体模型在计算时采用了以下几个方面的假设:

- ① 压缩机机头内部的气体为理想气体;
- ② 压缩机机头内部流场处于绝热状态;
- ③ 忽略润滑油对气体造成的影响。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51275210)

作者简介:龙骥,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:何雪明(1966—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: hxuem2003@163.com

收稿日期:2018-05-11

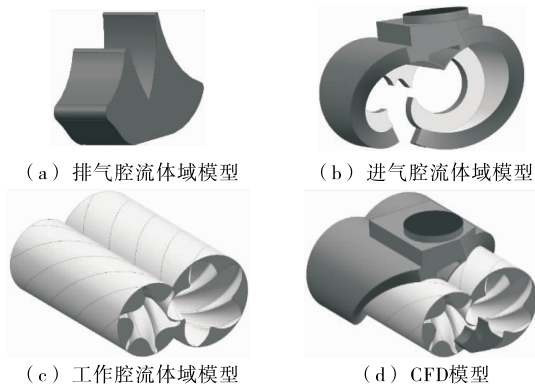


图 1 双螺杆压缩机 CFD 模型及组成部分

Figure 1 CFD model and components part of twin screw compressor

2.2 网格划分

本研究选择的 CFD 仿真软件是 STAR CCM+, 该软件是新一代的 CFD 求解器, 功能强大, 求解速度较快, 计算过程较稳定。

双螺杆压缩机的流体模型通常采用非结构化四面体网格划分^[12-13], 但由于非结构化四面体网格无法获得一个完全守恒的解决方案, 因此不能很好地满足双螺杆压缩机的 CFD 分析。本研究面网格划分选用“压印求差法^[10]”, 通过直接旋转阴阳转子的网格模型, 来模拟阴阳转子的运动, 利用压印和求差的方式得到工作腔流体模型, 然后将上一次迭代的结果映射到新生成的模型网格中继续计算, 可以保证阴阳转子间有足够小的间隙, 更加符合实际情况。而且每当转子转过一个齿的角度后, 将阴阳转子的面网格模型重新替换成原始的位置状态, 以消除由转子的旋转而累积的误差。该方法计算速度快, 精度高, 计算过程很稳定, 不容易出错。

本研究对排气腔流体域以及进气腔流体域采用多面体网格, 以加快计算的收敛速度。工作腔流体域是通过压印求差方式得到的, 而且在计算过程中不断进行, 所以适合采用切割体网格, 即六面体网格。流体域的面网格和体网格划分效果见图 2。

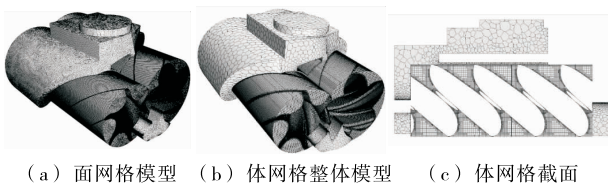


图 2 流体域网格模型

Figure 2 Fluid domain mesh model

2.3 计算物理模型

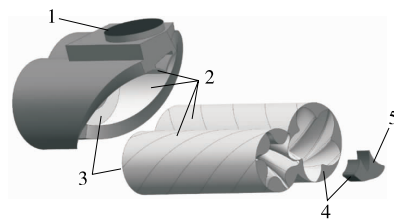
根据压缩机的工作状态和内部环境, 选择瞬态计算、Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 该模型能够适用雷诺应力中的约束条件, 可以保证 CFD 模型中与真实湍流中的雷诺应力保持相同, 从而能够更加精确地对平面及圆形射流的扩散速度进行模拟计算, 使得最终的模拟结果与真实情况更加吻合, 这是标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型都无法做到的。

2.4 边界条件和计算参数设置

根据压缩机的工作, 需要设置 CFD 模型的进出口、界面以及对应的相关参数。进气口与出气口的边界条件类型设置为压力出口边界 (Pressure Outlet), 并将两者的回流属性设置成正常回流边界 (Boundary Normal), 表示流体是垂直进入所设置的边界面。3 个流体域相接触的面属性需要设置为界面 (Interface), 它们重叠相交的部分即为界面面连通的部分。各个界面的位置与形状见图 3。其中界面 1 的连通形状和大小不会随着阴阳转子的转动变化, 运动属性设置为表面滑动 (Slide on Guide Surface), 而界面 2 和 3 的连通形状和大小会随着阴阳转子的转动不断改变, 运动属性设置为浮动 (Floating)。最后将其他的面都设置为固壁边界 (Wall)。进出口压力、时间步长、转子的转速等相关参数设置见表 1。

2.5 CFD 仿真结果分析

CFD 计算过程一般需要较长的时间, 不断计算迭代, 直到压缩机模型的压力、速度等参数到达了周期性稳定, 则说明计算已完成, 结果可以做压缩机稳态运行时的参考。图 4 为压缩机运行 0.12 s 后的螺杆齿面和轴向绝对压力分布云图, 可以看到螺旋槽中的压力梯度分布很明显, 此时压缩机内部最高压力值达到了 0.96 MPa。为了进一步查看压缩机螺杆中的压力梯度分布变化, 以及随时间压力变化情况, 在 CFD 模型中放置一些监视点, 如图 5 所示, 截面 a 离排气端面 10 mm, 在截面 a 中的圆周从圆周顶部开始, 间隔 72° 放



1. 压力入口 2. 界面 1 3. 界面 2 4. 界面 3 5. 压力出口

图 3 双螺杆压缩机流体域界面与压力出入口

Figure 3 Fluid domain interface and pressure inlet and outlet of twin screw compressor

表 1 CFD 计算中相关计算参数

Table 1 Related data tables in CFD computing

阳转子转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	阴转子转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	时间步长/ s	齿间时间 步长数	内部迭 代次数	工作时长/ s	进气口压力 (绝对压力)/MPa	出气口压力 (绝对压力)/MPa
2 940	2 450	5.102×10^{-6}	800	20	10	0.1	0.9

置一个监视点。然后底部的 2 个监视点沿轴向每隔 54 mm 再放置一个监视点,过监视点垂直于轴做截面,得到截面 b~e。

其中截面 a 中有 P1a、P2a、P3a、P4a 4 个监视点,截面 b~d 各有 2 个监视点,截面 e 中有 P5e 一个监视点。各点的间距与角度的设置恰好使得任意时刻图 5 中在同一个螺旋槽中的监视点一直都在同一个螺旋槽中。从理论上分析,在图 5 中所示的时刻,螺旋槽 1 的位置恰好脱离了低压区开始压缩,螺旋槽 5 的位置处于低压区,螺旋槽 2~4 压力逐渐增高。这些监视点处的压力随时间变化见图 6,值得说明的是,监视点是固结于机壳上的,并不随转子转动。从图 6 中可以看出同一个螺旋槽在不同截面处的压力变化完全一致,压力变化周期约为 0.004 s,恰好是阳转子旋转一个齿的时间。每个螺旋槽中的压力呈梯度分布,P5d 和 P5e 对应的位置处于进气的低压区,所以压力波动并不明显,其他的监视点都处于压缩过程,压力波动明显。

监视点 P4a 处于排气口处,其压力变化如图 6(b)所示,可以看到该点处的压力波动是最明显的,气体压力从 P3a 和 P3b 中的 0.26 MPa 直接压缩到 0.95 MPa 左右,说明该处螺旋槽的容积变化最剧烈,该点的最高压力与图 4 (a)中排气口处的压力相对应。将每个监视点的最高压力一起比较,如图 7 所示,可以看成阳转子转角为 0°时一个螺旋槽恰好吸气完成开始压缩的时刻,随着阳转子的转动,螺旋槽内部压力变化。从这些监视点的压力变化中可以看出,双螺杆压缩机

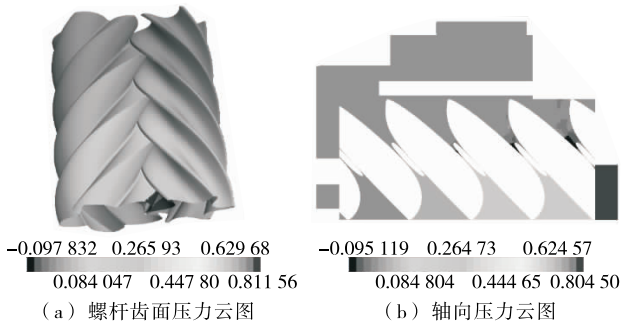
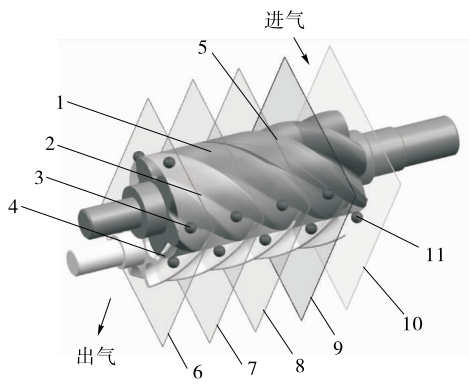


图 4 双螺杆压缩机 CFD 压力云图
Figure 4 CFD pressure cloud map of twin screw compressor



1. 螺旋槽 1 2. 螺旋槽 2 3. 螺旋槽 3 4. 螺旋槽 4 5. 螺旋槽 5
6. 截面 a 7. 截面 b 8. 截面 c 9. 截面 d 10. 截面 e 11. 监视点
图 5 CFD 仿真中监视点位置

Figure 5 Monitoring points position in CFD simulation

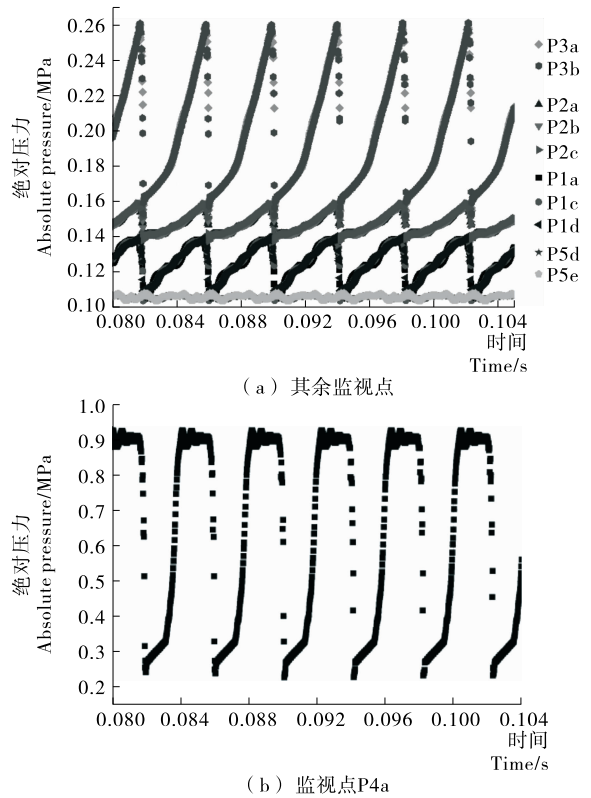


图 6 各监视点处压力—时间图
Figure 6 Pressure-time diagram at various monitoring points

的气体压缩过程并不是一个均匀的过程,越接近排气口变化越剧烈。从图 7 中可以更加直观地看到,随着阳转子的旋转,螺旋槽内部的压力前期很慢,但转角在约 300°之后,其内部的压力陡然增大。

3 双螺杆压缩机试验平台搭建

3.1 试验平台方案设计

为了能够验证双螺杆压缩机流体仿真结果的真实可靠性,搭建了试验平台来采集压缩机内部的压力数据。试验平台的示意图见图 8(a),主要机器设备有螺杆压缩机主机、信号采集处理系统、储气罐和计算机。而螺杆压缩机主机需要有油气分离器、冷却器、气体干燥器、电机等设备进行配套使

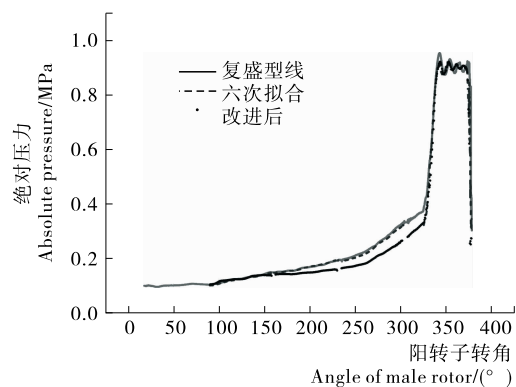


图 7 阳转子转角与压力关系图
Figure 7 The relationship between the transfer of the male rotor and the pressure

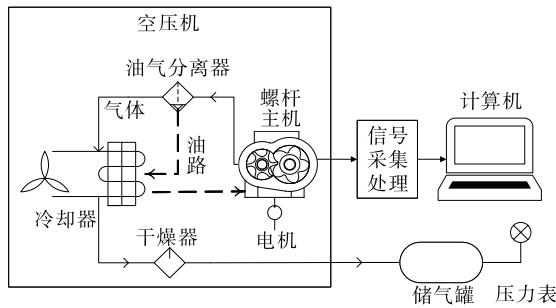


图 8 试验平台方案设计

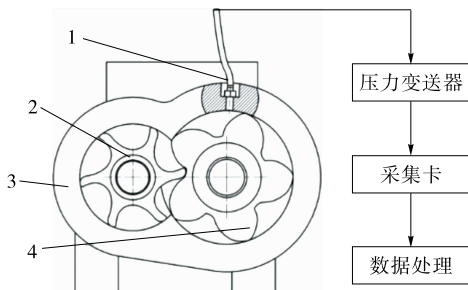
Figure 8 Design of experimental platform

用,这就组成了整个空压机的系统。

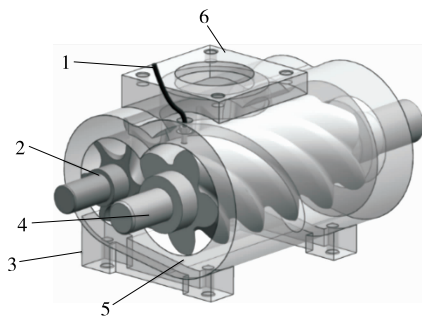
如图 9(a)所示,考虑到加工的可行性,为了安装压力传感器,需要在压缩机的机壳上打一个圆孔,将传感器安装在机壳上位于靠近排气端面的阳转子轴线正上方,即图 5 中视点 P1a 处。该传感器能够测出压缩机在工作工程中该点处的压力变化数据。压力传感器安装三维示意图见图 9(b)。

3.2 双螺杆压缩机试验数据采集与处理

试验中空压机的实际转速 $n_1 = 2\ 940\ \text{r/min}$,主机中的阳转子齿数 $z_1 = 5$,则阳转子转过一个齿的时间为: $T = 60 / (n_1 z_1) = 60 / (2\ 940 \times 5) = 0.004\ 082\ \text{s}$ 。



(a) 数据采集流程图



(b) 压力传感器安装三维示意图

- 1. 压力传感器 2. 阴转子 3. 机壳 4. 阳转子 5. 排气端面
- 6. 吸气端面

图 9 信号采集系统设计

Figure 9 Design of signal acquisition system

试验中在阳转子一个齿之间采集 100 个数据点,空压机在工作时有 2 个状态——加载和卸载状态。设定的排气压力为 0.8 MPa,压力下限是 0.7 MPa。在排气口压力未达到 0.8 MPa 之前,空压机启动后会处于加载状态,当排气口达到 0.8 MPa 时,空压机进气口关闭,处于卸载状态,此时压缩

机不再供气,当排气口压力回落到 0.7 MPa 时,空压机的进气口又重新开启,空压机又进入了加载状态,一直循环往复。

图 10 为空压机启动到停止整个过程中气体压力值变化图,共有近 1.9×10^5 个数据点。图 10 中空压机从静止状态启动后首先进入卸载状态,此时进气口不吸气,将原有的内部空气排空,空压机静止状态及卸载状态的采样数据分别见图 11(a)、(b),监测点卸载状态的压力值在从静止状态的 0.100 MPa 降至 0.008 MPa 左右。卸载状态的监测点压力值很混乱,并没有明显的周期性。

当开始阶段的排气完成后,空压机进入加载状态,进气口打开,开始吸气,空压机从卸载状态切换到加载状态如图 11(c) 所示,压力明显几乎瞬间升高,而且数据点开始具有一定的周期性,如图 11(d) 所示的加载状态,数据点以每 100 个点为周期循环,压力值为 0.10~0.15 MPa。这是阳转子的螺旋槽转过监测点的位置时引起的波动,时间间隔约为 0.004 s。

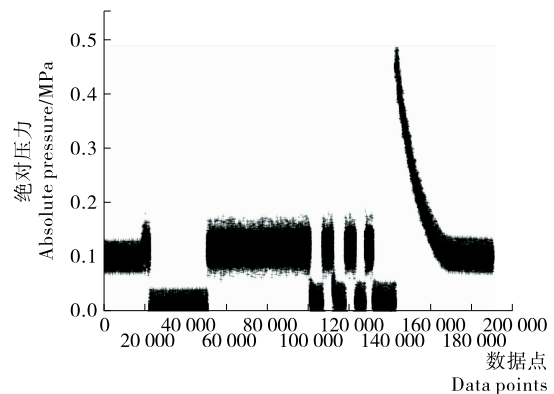


图 10 试验过程中的采样数据图

Figure 10 Sampling data in the process of experiment

当空压机的出口压力到达 0.8 MPa 之后,空压机进入卸载状态,进气口停止进气,采样点处的压力值落回 0.008 MPa 左右;待出口压力值降至 0.7 MPa 时,空压机又进入加载状态,使得出口压力加压至 0.800 MPa,监测点处的压力值重新恢复到 0.10~0.15 MPa,如此循环往复,如图 10 中第 1.0×10^5 个数据点后的几次震荡。

当空压机停机后,压缩机先切换到卸载状态,再停机。如图 10 中,第 1.4×10^5 万个数据点处,压力值从 0.008 MPa 瞬间增加到 0.500 MPa,这是由于压缩机停机后,卸载一段时间后就停机。停机时,储气罐中的气体还未排空,于是回流到压缩机内部,监测点的压力值瞬间增加到 0.500 MPa,随着储气罐中的气体排空,监测点的压力值慢慢回落到 0.100 MPa,即标准大气压的状态。

3.3 试验数据与流体仿真结果的对比

传感器安装的位置即为 CFD 仿真中的监视点 P1a,将仿真值与试验测量值进行对比,如图 12 所示,可以看到试验数据的采集点基本上与仿真值相匹配,压力大小的波动变化较一致,而且波动周期也很一致,误差的原因可能是传感器的装入对压缩机内部流场的破坏以及 CFD 仿真中一些理想化

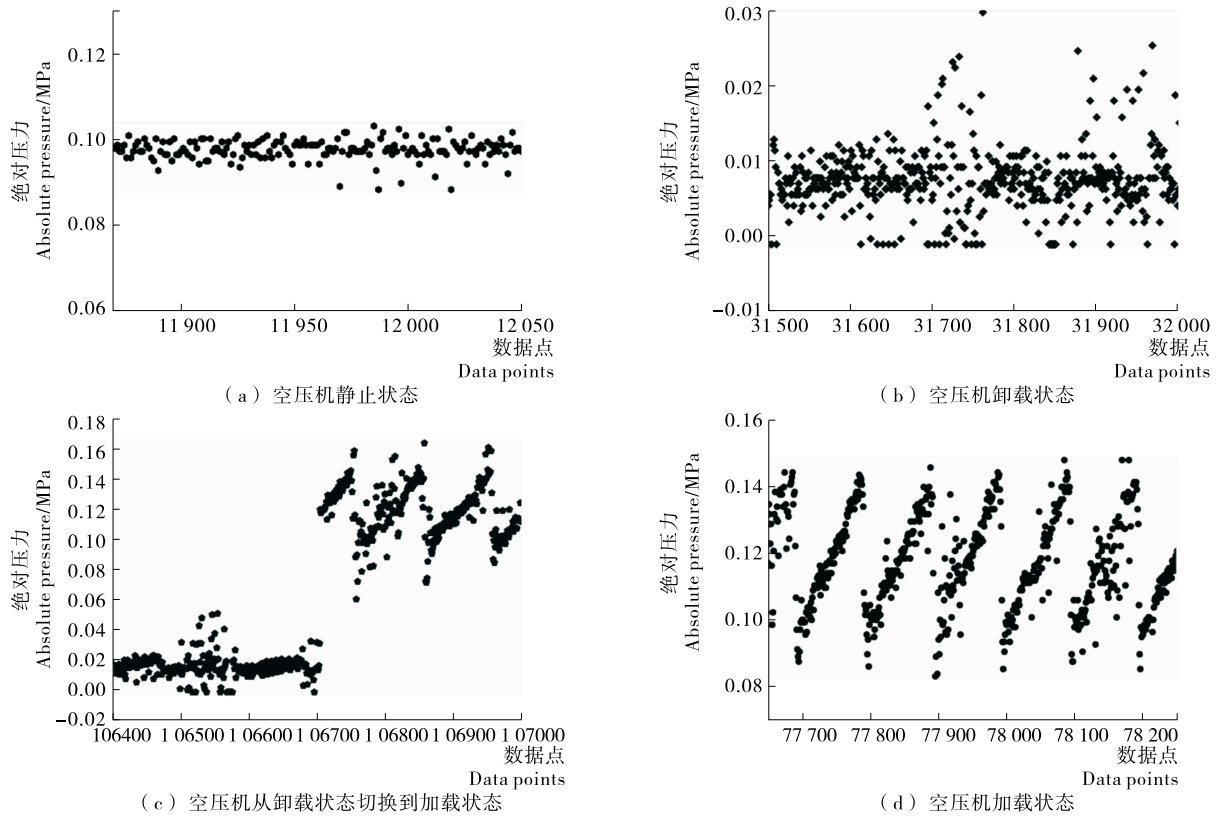


图 11 压缩机在各个状态的采样数据图

Figure 11 Sampling data diagram of the compressor in each state

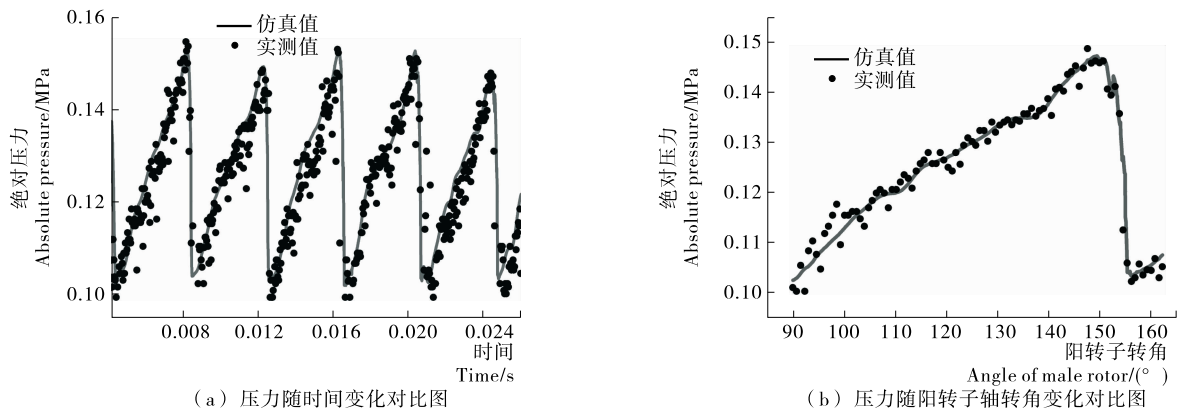


图 12 监测点处的仿真与实验值对比

Figure 12 Comparison of simulation and experimental values at monitoring points

的假设处理,整体上,最大误差在 5%左右,证明 CFD 仿真是可信、有效的。

4 结论

通过对双螺杆压缩机 CFD 仿真分析和实验验证,研究了双螺杆压缩机流体域中的压力变化,对比仿真分析中监测点和试验中与之相对应的实测点的压力值随时间的变化情况,得到试验采集值与仿真值在压力大小和波动周期方面整体上具有较好的一致性。由此可得,对双螺杆压缩机的 CFD 分析可以较好地反映气体压缩的过程,为进一步探究双螺杆压缩机工作过程中的其他特性提供了一种有效的方法。

参考文献

- [1] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.
- [2] 傅廷振, 林雨晨. 无油空压机技术为食品行业带来纯净气源[J]. 食品安全导刊, 2016(7): 72-73.
- [3] 阿特拉斯-科普柯公司. 阿特拉斯-科普柯公司在中国推出全新系列高效能压缩机[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 70.
- [4] 钱家祥. 螺杆压缩机在工艺流程领域的应用现状与前景分析[J]. 通用机械, 2015(2): 20-22.
- [5] 钱家祥. 空气动力用螺杆压缩机行业现状及发展趋势分析[J]. 通用机械, 2012(3): 19-23.

(下转第 146 页)

主成分有果形指数、单果重、硬度、弹性、咀嚼性、回复性、黏度、质地,可定义为质量因子;第2主成分的影响因子为可滴定酸、水分、可溶性固形物、风味,可定义为风味因子;第3主成分为L值、饱和度和外观,定义为色泽因子;第4主成分为黏聚性和内聚力。通过各因子得分对不同种葡萄进行综合分析,建立综合得分数学模型。通过计算,葡萄品质最好的为黑提、阳光玫瑰、魏可、红地球和巨玫瑰,巨峰、红宝石和金手指品质相对较差。

可见不同品种的鲜食葡萄品质存在差异,可以通过外在性状和内在品质进行综合评价。本试验建立的主成分分析模型可以有效地评价鲜食葡萄的品质,对鲜食葡萄的研究有一定的理论意义。但本研究所涉及的鲜食葡萄品种及检测指标较少,后续可以增加指标,建立更完善的综合评价体系。

参考文献

[1] 何映波. 水分胁迫对鲜食葡萄生理影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008: 1-2.
 [2] 刘凤之. 中国葡萄栽培现状与发展趋势[J]. 落叶果树, 2017(1): 1-4.
 [3] 杨中, 张静, 汤兆星. 新疆酿酒葡萄加工品质评价指标体系的建立[J]. 广东农业科学, 2011, 38(6): 119-123.
 [4] 江雨. 中国野生葡萄果实品质评价和主要物质组分研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2016: 41-44.
 [5] 刘美迎, 李小龙, 梁茁, 等. 基于模糊数学和聚类分析的鲜食葡萄品种综合品质评价[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 57-64.
 [6] GURAK P D, CABRAL L M C, ROCHALEÃO M H M, et al. Quality evaluation of grape juice concentrated by reverse osmosis[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(3): 421-426.
 [7] SHARMA A K, SOMKUWAR R G, BHANGE M A, et al. Evaluation of grape varieties for juice quality under tropical conditions of pune region[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences India, 2017(12): 1-5.
 [8] ROLLE L, GIACOSA S, GERBI V, et al. Comparative study of texture properties, color characteristics, and chemical composition of ten white table-grape varieties [J]. American Journal of Enology & Viticulture, 2011, 62(1): 49-56.
 [9] GRANATO D, SANTOS J S, ESCHER G B, et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72:

83-90.
 [10] 苏鹏飞, 杨丽, 张世杰, 等. 基于主成分分析的酿酒葡萄梅鹿辄的最佳采收期[J]. 中国食品学报, 2017, 17(7): 274-283.
 [11] 谢跃杰, 王仲明, 王强, 等. 不同品种和成熟度蓝莓理化特性的主成分分析评价[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 94-99.
 [12] 李丽. 速冻草莓品质评价体系的建立研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 22-23.
 [13] MORENO C. Mulch materials in processing tomato: a multivariate approach[J]. Scientia Agricola, 2013, 70(4): 250-256.
 [14] 田海龙, 张平, 农绍庄, 等. 基于TPA测试法对1-MCP处理后葡萄果实质构性能的分析[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 104-107.
 [15] 赵滢, 杨义明, 范书田, 等. 基于主成分分析的山葡萄果实品质评价研究[J]. 吉林农业大学学报, 2014(5): 575-581.
 [16] 张群, 叶纯, 唐鼎, 等. 预处理方式对提子类葡萄贮藏期间质地的影响[J]. 食品与机械, 2014(3): 132-136.
 [17] 姜松, 王海鸥. TPA质构分析及测试条件对苹果TPA质构分析的影响[J]. 食品科学, 2004, 25(12): 68-71.
 [18] HERNANZ D, ANGELES F Recamales, MELÉNDEZMARTÍNEZ A J, et al. Multivariate statistical analysis of the color-anthocyanin relationships in different soilless-grown strawberry genotypes [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(8): 2 735-2 741.
 [19] BERARDINI N, KNÖDLER M, SCHIEBERA, et al. Utilization of mango peels as a source of pectin and polyphenolics[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2005, 6(4): 442-452.
 [20] 马小河, 赵旗峰, 董志刚, 等. 鲜食葡萄品种资源果实数量性状变异及概率分级[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(6): 1 185-1 189.
 [21] 刘春艳, 谢岳, 李栋梅, 等. 基于主成分分析的酿酒葡萄果实评价[J]. 北方园艺, 2017(11): 13-17.
 [22] 潘治利, 罗元奇, 艾志录, 等. 不同小麦品种醇溶蛋白的组成与速冻水饺面皮质构特性的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 242-248.
 [23] FRANCINI A, ROMEO S, CIFELLI M, et al. ¹H NMR and PCA-based analysis revealed variety dependent changes in phenolic contents of apple fruit after drying[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 206-1 211.
 [24] GIRSCHIK L, JONES J E, KERSLAKE F L, et al. Apple variety and maturity profiling of base ciders using UV spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 323-329.

(上接第110页)

[6] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. Screw Compressors: Mathematical Modeling and Performance Calculation [M]. Berlin: Springer, 2005: 32-34.
 [7] KIM T Y, LEE J Y, KIM Y J. Experimental study on the performance of screw compressor with various shapes of air end[J]. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 2013, 16(1): 5-10.
 [8] 史文延, 余晓明, 李金峰. 双螺杆压缩机转子的有限元模态分析[J]. 压缩机技术, 2012(4): 7-9.

[9] 魏静, 孙旭建, 孙伟, 等. 双螺杆捏合机转子型线设计与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 63-73.
 [10] 何雪明, 施国江, 武美萍, 等. 双螺杆压缩机CFD分析新方法的研究与应用[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(2): 211-219.
 [11] 邢子文. 螺杆压缩机: 理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 8-26.
 [12] 张小军, 彭学院, 邢子文. 双螺杆压缩机排气压力脉动理论计算和试验研究[J]. 压缩机技术, 2001(6): 3-6.
 [13] 吴慧媛, 何雪明, 戴进. 基于CFD的双螺杆压缩机的三维动态仿真分析研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(24): 3 366-3 371.