

冰箱压缩机启动过程排气噪声特性及优化

吴小凌¹⁾ 陈会平¹⁾ 李顺¹⁾ 吴世杰²⁾ 张师帅²⁾

¹⁾(广州万宝集团压缩机有限公司)

²⁾(华中科技大学)

摘要 根据冰箱压缩机启动过程的特点,采用 ANSYS 软件对冰箱压缩机排气管路进行流场和声场模拟仿真计算,分析冰箱压缩机启动过程排气噪声特性。在排除偶极子噪声和四极子噪声的基础上得出,单极子声源对启动过程的排气噪声贡献最大。考虑到单极子噪声主要受气流速度影响,为降低排气流域最高气流速度,提出将排气腔与排气管进口的连接管道由单通道调整为双通道。仿真结果表明,双通道模型可以使启动过程中排气流域最高气流速度下降 5~20 m/s,使排气噪声总声压级下降 2~5 dB,进一步验证双通道结构降噪的有效性。研究结果可以为解决冰箱压缩机启动过程排气噪声问题提供理论依据。

关键词 冷冻冷藏;冰箱;压缩机;启动过程;排气噪声

Exhaust noise characteristics of refrigerator compressor during startup process and its optimization

Wu Xiaoling¹⁾ Chen Huiping¹⁾ Li Shun¹⁾ Wu Shijie²⁾ Zhang Shishuai²⁾

¹⁾(Wanbao Group Compressor Co., Ltd.)

²⁾(Huazhong University of Science and Technology)

ABSTRACT According to the characteristics of the startup process of the refrigerator compressor, the flow field and sound field of the exhaust pipe of the refrigerator compressor are simulated by using the ANSYS software, and the exhaust noise characteristics of the refrigerator compressor during the startup process are analyzed. On the basis of eliminating dipole noise and quadrupole noise, it is concluded that monopole sound source contributes the most to exhaust noise during startup process. Considering that the monopole noise is mainly affected by the airflow velocity, in order to reduce the maximum airflow velocity in the exhaust area, it is proposed to adjust the connecting pipe between the exhaust chamber and the exhaust pipe inlet from a single channel to a dual channel. The simulation results show that the dual channel model can reduce the maximum airflow velocity in the exhaust area by 5~20 m/s and the total sound pressure level of exhaust noise by 2~5 dB during the startup process, further verifying the effectiveness of dual channel structure noise reduction. The research results can provide a theoretical basis for solving the exhaust noise problem of refrigerator compressor during startup process.

KEY WORDS freezing and cold storage;refrigerator;compressor;startup process;exhaust noise

压缩机是冰箱噪声的主要来源,随着家电行业对冰箱整体噪声水平要求的提高,降低冰箱压缩机噪声水平的要求日益紧迫^[1-3]。冰箱压缩机启

动过程中存在较大噪声,这将导致消费者听感效果较差^[4]。目前,国内外研究人员从优化吸气消声器结构、改变底座压簧刚度等方面,对降低冰箱压缩

收稿日期:2022-11-21,修回日期:2022-12-16

通信作者:张师帅,博士,副教授,主要研究方向为流体机械及流体工程研究。

机启动噪声展开深入研究,并取得了一些成果^[5-7]。

笔者基于国内外已有研究成果,从冰箱压缩机排气管路入手,采用 ANSYS 软件,对某系列冰箱压缩机排气管路进行流场和声场仿真计算,分析冰箱压缩机启动过程中的排气噪声特性。在此基础上提出降低冰箱压缩机启动噪声的方案,并通过仿真计算验证降噪方案的有效性,为解决冰箱压缩机启动噪声问题提供理论依据。

1 启动过程特点

某系列冰箱压缩机吸气压力为 58 kPa, 排气压力为 840 kPa, 额定转速为 2 920 r/min。对冰箱压缩机启动过程进行综合分析可知, 冰箱压缩机的启动过程可分为 3 个阶段: 第一阶段 0~0.4 s, 为变转速过程, 压缩机转速由 0 r/min 上升到额定转速 2 920 r/min, 吸排气压力保持不变, 均为 400 kPa; 第二阶段 0.4~30 s, 为恒定转速过程, 吸气压力由 400 kPa 降到 58 kPa, 排气压力由 400 kPa 升到 840 kPa; 第三阶段 30 s 之后, 启动过程结束, 压缩机进入稳定运行阶段。

由于启动过程中的变转速阶段持续时间较短, 故可以忽略; 启动过程中吸气压力不断下降, 排气压力不断上升, 而压缩机每个周期循环中气缸吸入的体积流量基本保持不变。排气压力的升高导致气体密度不断升高, 即在启动过程中排气质量流量不断下降, 导致排气流域的气流速度呈现不断下降的趋势, 而气流速度对排气噪声影响较大, 因此需要重点研究启动过程第二阶段的排气噪声特性。

2 数值模拟方法

2.1 模型网格

冰箱压缩机排气流域包括排气腔和排气管路 2 个部分, 采用 ANSYS MESH 软件对排气流域进行网格划分, 网格单元采用四面体, 最大网格尺寸为 0.5 mm, 模型几何尺寸细小处网格采用局部加密处理^[8-10]。最终获得的网格总数约 300 万个, 排气流域模型网格如图 1 所示。

2.2 模拟方法

压缩机工作过程包含吸气、压缩、排气、膨胀这 4 个过程, 较为复杂, 涉及活塞的往复运动以及阀片的开启与关闭, 阀片与流体的相互作用构成了双向流固耦合^[11-12]。为最大程度上还原压缩机工作过程, 首先利用变压力边界条件构建关于阀片的全流道双向流固耦合模型, 但活塞往复运动



图 1 冰箱压缩机排气流域模型网格

及阀片的来回摆动导致流域体积变化, 难以建立与之相互匹配的声学模型, 因而流固耦合的计算目的是获取排气的脉动数据以便后续的排气流场及声场数值模拟计算。

压缩机完成一个工作循环周期需要约 0.02 s, 而启动过程第二阶段为 30.0 s。为节约计算资源, 利用测试的进出口压力数据, 按照压力变化情况, 选取 10 个最能体现压力变化的计算工况点(见表 1)代表整个启动过程^[13-14]。流固耦合的具体设置及方法见参考文献[15], 每个工况点计算 3 个周期。

表 1 启动过程模拟计算选取的工况点

工况点	时间/s	吸气压力/kPa	排气压力/kPa
1	0	400.0	400.0
2	0.5	352.0	454.6
3	1.0	310.0	501.0
4	1.5	273.6	550.1
5	2.0	241.8	592.8
6	3.0	190.5	661.8
7	4.0	152.4	713.1
8	6.0	103.9	778.3
9	9.0	71.8	821.4
10	30.0	58.0	840.0

在声场计算前, 必须先进行流场计算。将流固耦合计算获得的排气脉动数据加载到排气流域模型进口处, 出口设置为压力边界条件, 压力值与流固耦合计算时保持一致, 考虑到模型结构的复杂性, 以及网格划分的难度, 选取 DES 湍流模型进行瞬态计算, 并保留瞬态计算结果(压力、密度、速度等), 每个工况点计算 3 个周期, 计算步长为 4×10^{-5} s。本次流场计算使用 CFX 软件, 流体介质为 R600a 制冷剂。

将流场计算结果导入专业声学软件计算气流噪声, 声学计算模型与流场模型保持一致, 声学网格的划分需要满足最大网格尺寸小于研究频率范

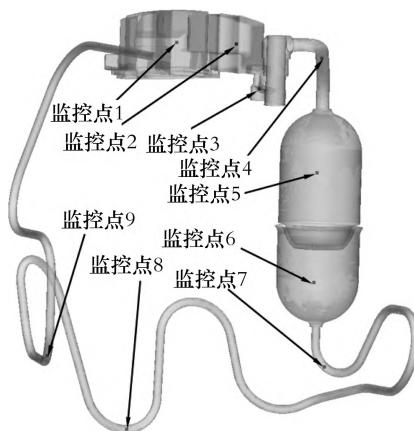


图 2 冰箱压缩机排气流域声学监控点布置

围内波长的 $1/6$ 。仿真声学监控点如图 2 所示。

3 计算结果及分析

采用 ANSYS 软件, 对压缩机启动过程中的 10 个工况点进行流场和噪声计算, 对每个工况点下的 9 个监控点的频谱图进行分析, 发现存在如下现象: 监控点 1 和 2, 监控点 3~6, 以及监控点 7~9, 其峰值对应的频率的重合度比较高, 其中工况点 1 下监控点 3~6 的频谱见图 3。可见, 压缩机启动噪声中偶极子噪声的贡献较小。这主要是由于偶极子噪声属于力声源, 各个监控点处的受力均不相同, 原则上噪声峰值对应的频率应各不相同。但实际上噪声峰值对应的频率的重合度较高, 因此压缩机启动噪声中偶极子噪声的贡献不大。

对排气流域涡量频率云图进行分析可以发现, 除工况点 10 (该工况点临近启动过程结束, 接近稳定状态), 每个工况点排气流域的涡量频率都较高, 大多在 8000 Hz 以上, 其中工况点 2, 4, 6 和 8 下的排气流域涡量频率云图见图 4, 噪声测试频谱上的峰值大多在 4000 Hz 以内。可见, 压缩机启动噪声中四极子噪声的贡献不大。这主要是由于四极子噪声属于涡流噪声, 绝大多数涡流频率不在噪声峰值的频率范围内, 因此压缩机启动噪声中四极子噪声的贡献不大。

从以上分析以及结合文献 [15] 可以得出如下结论: 在排除偶极子声源和四极子声源之后, 排气噪声主要来源于单极子声源。理论上, 单极子噪声主要受气流速度的影响。可见, 排气流域的气流速度决定了启动噪声的大小。

图 5 所示为冰箱压缩机启动过程中各个工况点的最高气流速度。可以看出, 启动过程中排气流域最高气流速度随着时间的延长呈现不断下降

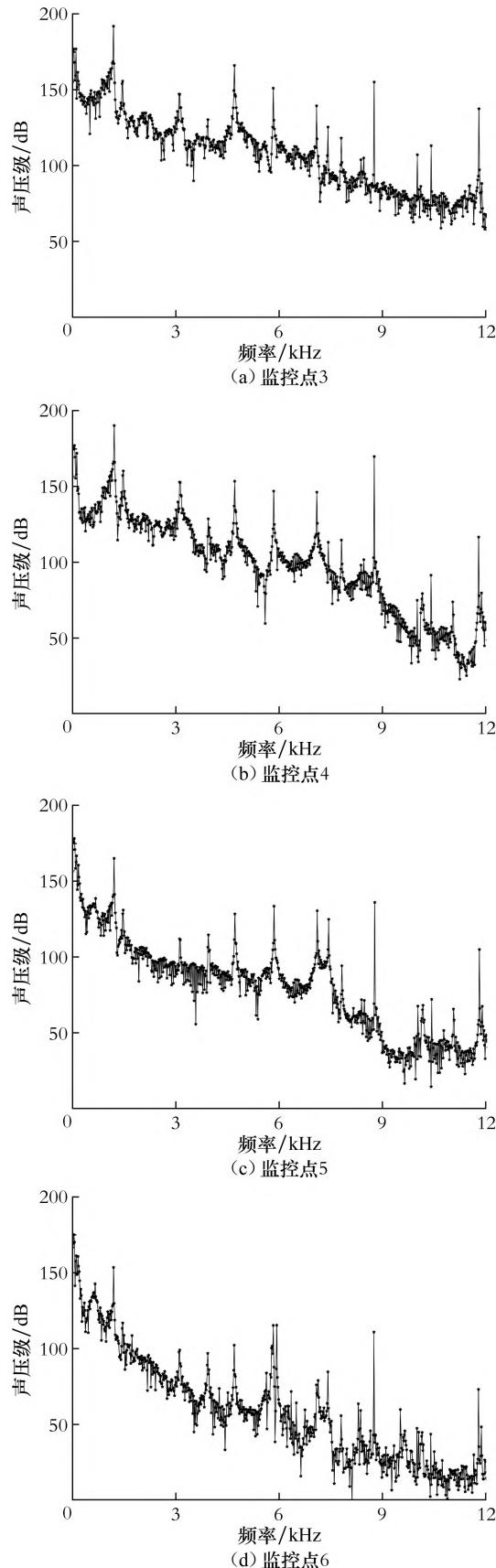


图 3 冰箱压缩机启动过程中工况点 1 下监控点 3~6 的频谱

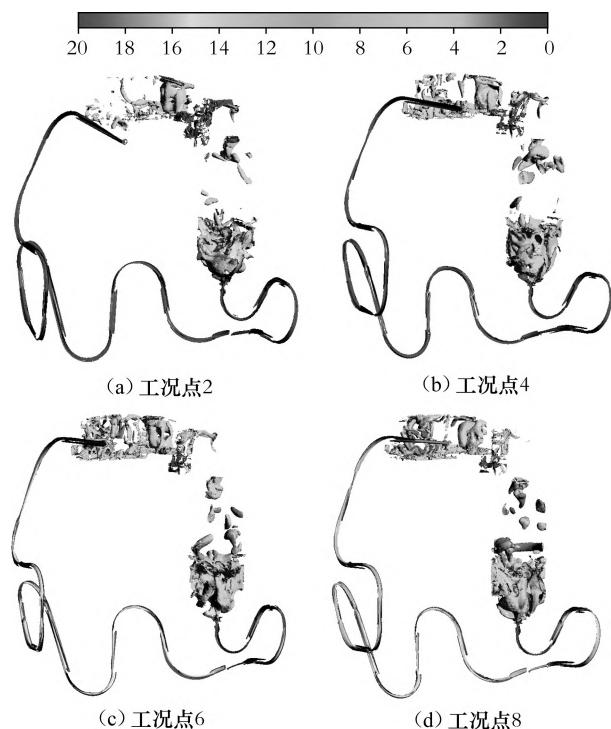


图 4 冰箱压缩机启动过程中工况点 2,4,6 和 8 下的排气流域涡量频率(kHz)云图

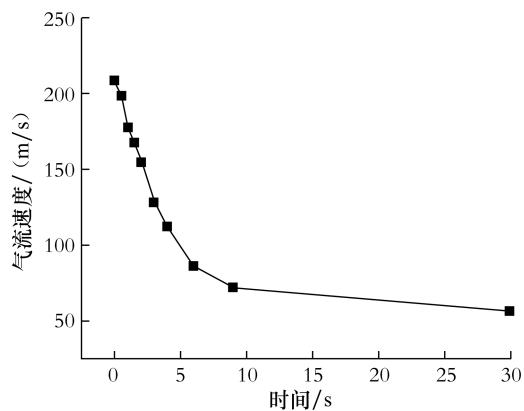


图 5 冰箱压缩机启动过程中最高气流速度变化

的趋势,这与启动过程中监测到的噪声变化非常相似。

对启动过程中各个工况点下的排气流域流速云图进行分析可以发现,最高流速均出现在排气腔与排气管进口的连接处,其中工况点 2,4,6 和 8 下的排气流域流速云图见图 6。这主要是因为该处流通面积较小,导致流速较大。

由此可见,可以通过扩大排气腔与排气管进口连接处的流通面积,降低该处气流速度,从而降低压缩机启动噪声。

4 噪声优化及验证

为了降低排气流域最高气流速度,需要将排

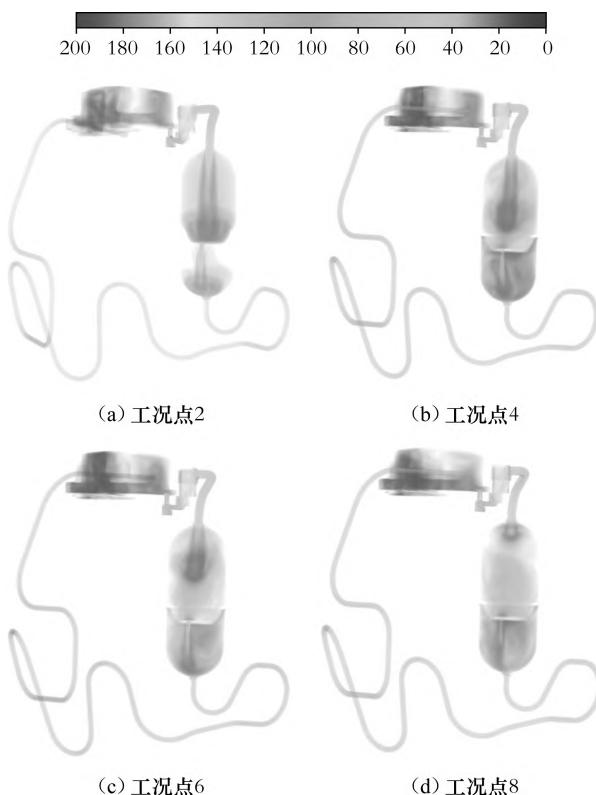
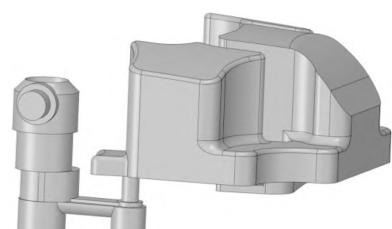
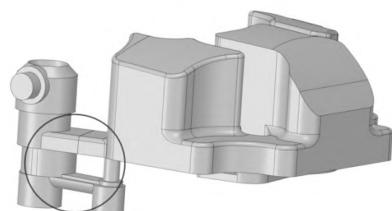


图 6 冰箱压缩机启动过程中工况点 2,4,6 和 8 下的排气流域流速(m/s)云图

气腔与排气管进口连接处的流道扩大。但考虑到如果将该处的流通面积扩大,会引起结构强度不足,同时影响密封性能,故放弃在原有单通道基础上扩大流通面积的想法,而是采用一种双通道结构。这种双通道结构已经在其他型号的冰箱压缩机上得到应用。单通道模型和双通道模型的结构如图 7 所示。



(a) 单通道模型



(b) 双通道模型

图 7 单通道模型和双通道模型结构

同样,针对双通道模型进行启动过程中流场和噪声的仿真计算,10 个工况点的选取以及噪声计算 9 个声学监控点的设置均与单通道模型相同。采用 ANSYS 软件,对双通道模型的启动过程中的 10 个工况点进行流场和噪声计算,并将计算结果与单通道模型进行对比,见图 8~图 10。

图 8 所示为冰箱压缩机启动过程中单通道模型与双通道模型的最高气流速度对比情况。可以看出,双通道模型的最高气流速度相较于单通道模型下降了 5~20 m/s。单通道截面积为 4.453 4 mm²,调整后的双通道截面积为 13.228 5 mm²,约为单通道的 3 倍。从图 8 可以看出,最高气流速度的下降,并没有表现出与截面积相对应的调整程度。

这主要是因为双通道模型的最高流速位置发生了变化,由排气腔与排气管进口的连接处向后

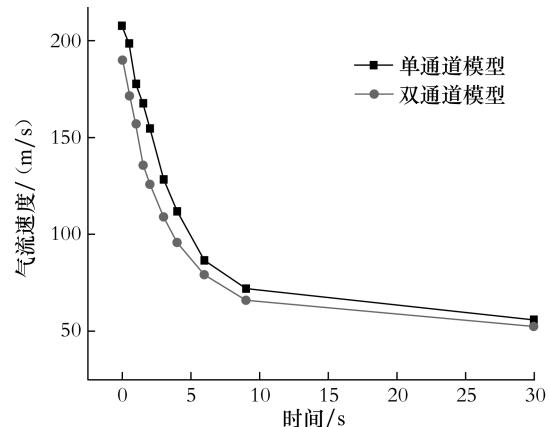
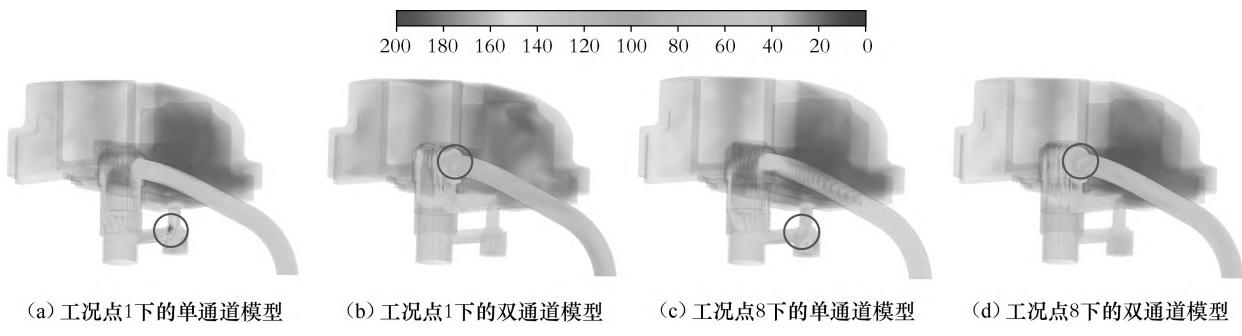


图 8 冰箱压缩机启动过程中单通道模型与双通道模型的最高气流速度对比

移到了排气管进口处,排气管进口处的气流速度仍然较高(见图 9)。



(a) 工况点1下的单通道模型 (b) 工况点1下的双通道模型 (c) 工况点8下的单通道模型 (d) 工况点8下的双通道模型
图 9 冰箱压缩机启动过程中单通道模型与双通道模型的最高流速(m/s)位置变化

冰箱压缩机启动过程中单通道模型与双通道模型的排气噪声总声压级对比如图 10 所示。可以看出,双通道模型的排气噪声总声压级相较于单通道模型下降了 2~5 dB。

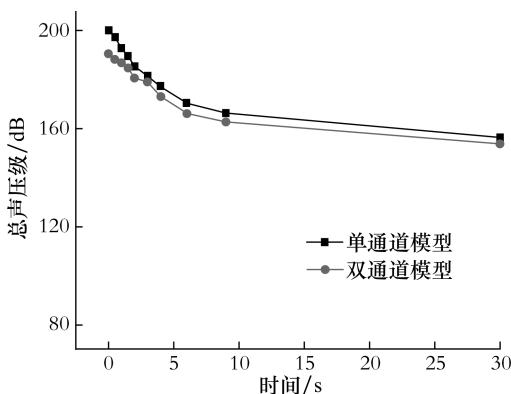


图 10 冰箱压缩机启动过程中单通道模型与双通道模型的排气噪声总声压级对比

5 结论

笔者首先分析了冰箱压缩机启动过程特点,

然后采用 ANSYS 软件对冰箱压缩机排气管路进行流场和声场模拟仿真计算,分析冰箱压缩机启动过程中排气噪声特性,并进行噪声优化及验证,得出如下结论:

- 1) 冰箱压缩机启动过程中排气噪声主要来源于单极子声源,偶极子声源和四极子声源的贡献不大;
- 2) 与单通道模型相比,采用双通道模型后,可以使冰箱压缩机启动过程中排气腔与排气管进口的连接处排气流域的最高气流速度下降 5~20 m/s,排气噪声总声压级下降 2~5 dB。

研究结果可以为冰箱压缩机启动过程排气噪声优化提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 周明龙,陈文卿,邢子文,等. 冰箱压缩机噪声控制技术综述[J]. 家电科技,2020(5):66-70.
- [2] 王松,靳海水,邓志强,等. 冰箱压缩机声品质研究[J]. 家电科技,2021(2):52-54,57.
- [3] MU G Y, WANG F, MI X Z, et al. Dynamic modeling

- and analysis of compressor reed valve based on movement characteristics[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150:522-531.
- [4] 陈新杰, 黄刚, MARQUES R S, 等. 冰箱压缩机启动噪声改善[C]//2018年中国家用电器技术大会论文集. 2018:1301-1306.
- [5] 吴小凌, 斯海水, 陈会平, 等. 基于CFD分析的往复式压缩机启动噪声研究[C]//2021年中国家用电器技术大会论文集. 2021:2192-2198.
- [6] 李语亭, 王利亚, 陈新杰, 等. 冰箱启动噪声的分析与优化[J]. 家电科技, 2019(2):66-68, 73.
- [7] 陈新杰, 黄刚, 武文杰, 等. 小型化往复式压缩机匹配冰箱系统启动噪声改善[C]//2021年中国家用电器技术大会论文集. 2021:2078-2083.
- [8] 王俞, 金华强, 顾江萍, 等. 基于流固耦合模型的制冷压缩机排气回流研究[J]. 高技术通讯, 2020, 30(7):724-734.
- [9] YU X, TAN Q, REN Y, et al. Numerical study of the reed valve impact in the rotary compressor by FSI model[J]. Energy Procedia, 2017, 105:4890-4897.
- [10] ZHAO B, JIA X H, SUN S K, et al. FSI model of valve motion and pressure pulsation for investigating thermodynamic process and internal flow inside a reciprocating compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131:998-1007.
- [11] 吕剑乔, 张建润. 冰箱压缩机室盖板结构降噪分析与设计[J]. 机电信息, 2021(11):46-48.
- [12] 黄文才, 王利亚, 江俊, 等. 基于固有频率的冰箱排气管结构优化设计[J]. 家电科技, 2021(3):86-89, 93.
- [13] 韩宝坤, 魏国, 孙晓东. 某型往复式制冷压缩机吸/排气噪声源在自由场中的辐射特性研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6):710-714.
- [14] 李天宇, 蒋伟康, 王海军. 滚动转子压缩机排气流噪声数值计算与机理分析[J]. 流体机械, 2021, 49(6):15-21.
- [15] 吴世杰, 张师帅, 吴小凌, 等. 冰箱压缩机排气管路流致噪声和振动的数值模拟[J]. 制冷与空调, 2022, 22(6):79-86.

(上接第 100 页)

- 变工况运行特性试验研究[J]. 制冷与空调, 2021, 21(1):71-75.
- [8] 中国机械工业联合会, 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. 容积式制冷剂压缩机性能试验方法: GB/T 5773—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [9] 中国机械工业联合会, 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. 螺杆式制冷压缩机: GB/T 19410—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 岳峰, 马广玉, 刘福来, 等. 螺杆式压缩机在低温工况下

- 的测试分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(9):21-24, 33.
- [11] 中华人民共和国商务部. 冷库设计标准: GB 50072—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [12] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范(2018年版): GB 50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [13] 天津夏季的天气 [EB/OL]. (2023-05-02) [2023-05-05]. <https://zh.weathers-park.com/s/131784/1/> 中国、天津的夏季平均气温 # Figures-Temperature.