

汽车空调压缩机启动噪声测试与控制方法*

曹昱坤¹, 向银^{1,2}, 胡立志¹, 何泽银^{1,2}, 李德江¹, 聂豪¹, 陈彤¹

(1. 重庆建设汽车系统股份有限公司汽车热管理系统研究院 重庆, 400052)

(2. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆, 400074)

摘要 针对旋叶式压缩机的启动噪声,对压缩机系统进行了试验、分析和改进。在半消声室中搭建了噪声测试试验平台,测试了压缩机的启动噪声,分析了压缩机的启动机制。提出了控制启动噪声时长的措施,试验测试不同球阀结构及离合器结构对压缩机启动噪声的控制效果,并在整车上对球阀结构与离合器结构的控制效果进行了试验验证。结果表明:旋叶式压缩机的启动噪声是不可避免的固有表征;通过优化压缩机球阀结构及离合器结构的控制方法能够有效缩短启动噪声时长 1~2 s。

关键词 旋叶式压缩机;启动噪声;测试方法;噪声控制;汽车空调

中图分类号 TH455

引言

空调压缩机是汽车空调系统的核心,同时也是不可忽略的振动源,在开空调时必然引起一些振动噪声问题^[1-3]。旋叶式压缩机具有部件少、转速高、效率高和成本低等优点,被广泛应用于中小排量汽车空调系统中^[4-5]。由于旋叶式压缩机空调在启动时会产生持续的噪声,因此研究旋叶式压缩机启动噪声具有重要的工程应用价值。

国内外对空调压缩机噪声已有一定的研究。陈文卿等^[6]提出了变频螺杆制冷压缩机的降噪设计方法,并通过试验验证了各种降噪方法的有效性。谭龙龙等^[7]根据离心式压缩机的噪声特性和吸隔、消声的基本理论,设计吸隔型隔声罩与阻抗复合式消声器相结合的降噪方法。张荣婷等^[8]分析了变频压缩机周期性噪声产生的根源,并提出了改进措施。常晶晶等^[9]通过改进压缩机支架结构,使车内异响得到明显改善。杨诚等^[10]基于快速诊断,确定车内异响主要辐射源为膨胀阀和蒸发器,并采取减振降噪措施,有效降低了车内异响。商国旭等^[11]针对空调开启时车内噪声异常的问题,提出了优化支架结构的改进方案,并验证了改进效果。陈志勇等^[12]通过改变压缩机皮带轮直径,解决了空调开启时的异常噪声问题。He 等^[13]提出了螺杆压缩机的 3 种降噪方案,并对其降噪性能进行了实验,结果表明压缩

机噪声得到显著改善。Shen 等^[14]针对变频双螺杆制冷压缩机提出了 2 种降噪方法,仿真和试验结果均表明 2 种方法都有较好的降噪效果。Mao 等^[15]对两级离心式压缩机的振动噪声特性进行了试验研究,所设计的微穿孔板吸收器能有效降低压缩机的噪声。以上针对空调压缩机噪声控制的研究主要集中于控制空调系统的机械激励、气流脉动激励以及压缩机与空调系统部件共振等产生的噪声,对旋叶式压缩机的启动噪声及其控制鲜有研究。

笔者针对旋叶式压缩机的启动噪声,搭建了噪声测试平台,分析了压缩机的启动机理。提出了控制启动噪声时长的措施,试验测试了不同球阀结构、离合器结构对压缩机启动噪声的控制效果,并在整车上对球阀结构与离合器结构的控制效果进行了验证。

1 启动噪声试验方法与机制分析

1.1 启动噪声产生机理

旋叶式压缩机主要由气缸、转子、叶片、前后端盖、阀片、油分和壳体等组成,图 1 为某型旋叶式压缩机结构示意图。

旋叶式压缩机工作时,叶片在叶片槽内做径向往复运动,叶片端部在气体力、背压力、摩擦力、润滑油黏滞阻力和往复惯性力等共同作用下与缸体内壁

* 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0799);重庆市科技计划资助项目(202002001Z)

收稿日期:2022-01-06;修回日期:2022-02-18

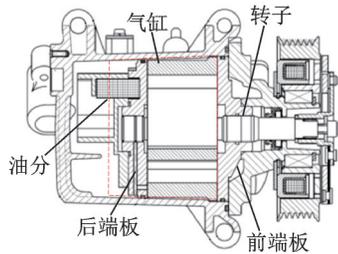


图1 旋叶式压缩机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotary vane compressor structure

保持接触,其中背压力起主要作用。启动噪声是指压缩机启动初期,当背压力不足以平衡其他外力时,叶片端部不能始终与缸体内壁保持接触,而在某一旋转角度出现叶片端部与缸体内壁脱离,再次接触时产生撞击噪声。

旋叶式压缩机启动初期,由于制冷剂迁移,液态制冷剂多储存在气液分离器和压缩机中,建立起一定大小的吸、排气压力需要一段时间,而背压力与排气压力相关,因此这段时间内的背压力过小,导致叶片与气缸内壁发生反复接触碰撞,产生启动噪声。另外,在压缩机启动过程中,当有大量的液态制冷剂进入气缸时,将出现液压缩现象,压缩腔内液态制冷剂压力上升的速度远大于气体制冷剂,在排气阀片提前开启的同时,将导致叶片端部与缸体内壁脱离并产生启动噪声。

1.2 启动噪声试验方法

为了研究旋叶式压缩机启动噪声,在半消声室中搭建噪声测试平台,进行以振动噪声为主的多参量测试分析。该测试系统主要由吸气压力脉动传感器、排气压力脉动传感器、转速传感器、振动传感器及传声器传感器等组成。旋叶式压缩机通过刚性支架安装在试验台上,且半消声室外有连接制冷负荷系统,实现对压缩机运转条件的稳定控制。噪声测试台如图2所示。

环境温度设置为 10°C ,压缩机以 800 r/min 稳定

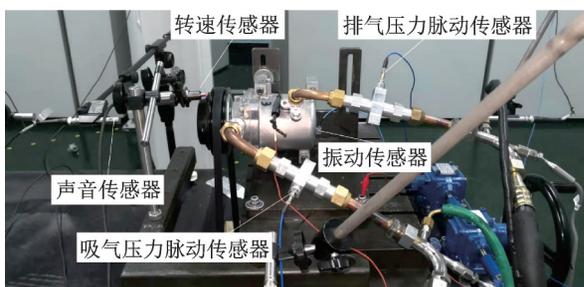


图2 噪声测试试验台

Fig.2 Noise test bench

运行。当压缩机吸排气压力平衡时启动压缩机,稳定运行 0.5 h 后停机。循环6次试验,每次均需吸排气压力平衡后且冷机状态时再启动,采集实时动态参量(噪声、振动、压力等),通过Test Lab测试系统处理试验数据。

1.3 启动噪声机制分析

以某型旋叶式压缩机为试验对象,在台架上进行试验。根据启动噪声产生机理,在试验过程中对测试参量进行监控,主要有2个方面:①通过对吸排气压力的监控,观测启动瞬间叶片伸出过程中所受气体力的变化特征;②通过使用高频振动传感器监控启动瞬间叶片与缸体内壁之间摩擦力的变化特征,通过电容式传声器记录声音变化的时长与频率范围。压缩机各实时参数总值如图3所示,记录了单次启动试验中噪声声压级(sound pressure level, 简称SPL)、振动加速度与吸、排气压力的变化特征。

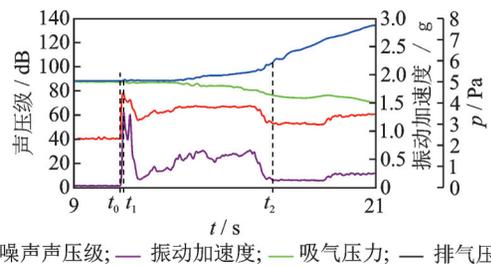


图3 压缩机各实时参数总值

Fig.3 Total value of real time parameters of the compressor

图4为压缩机启动过程中叶片状态。 t_0 时刻之前,叶片处于自由状态,吸、排气压力处于平衡。 t_0 时刻启动压缩机,压缩机转子与离合器衔铁在 t_1 时刻瞬间吸合,在压缩机本体通过高频振动传感器及电容式传声器测得图3中最大峰值,对应为叶片伸出起始时刻 t_1 。 $t_1\sim t_2$ 时刻为启动过程,压缩机分别通过吸排气管路、内部油路形成吸、排气压力与叶片槽背压力,叶片在背压力的作用下伸出叶片槽,由于此阶段背压力尚小,叶片与缸体内壁会反复接触碰撞,测试数据中的振动与噪声曲线在图3中呈现为锯齿波动。 t_2 时刻,吸、排气压力达到一定数值后,

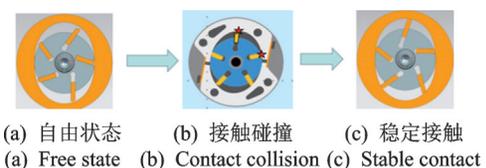


图4 压缩机启动过程中叶片状态

Fig.4 Blade status during compressor startup

背压力足够大,使得叶片与缸体内壁稳定接触,此时图3中的噪声、振动曲线开始趋于稳定,压缩机启动完成。由此可根据各时刻点计算出该次试验中叶片完全伸出所需时间。

吸、排气压力由平衡值到稳定值的过程中,叶片端部与缸体内壁的反反复复接触碰撞将产生启动噪声,一旦吸、排气压力达到稳定数值后,启动噪声将消失。因此,启动噪声是该型压缩机不可避免的固有表征,控制启动噪声时长是最有效的措施之一。

2 启动噪声控制方法

2.1 球阀结构控制启动噪声

叶片在多源复杂激励下与缸体内壁表面保持接触,叶片槽背压力起主要作用。背压力主要是通过内部油路传递油压,其压力大小与排气压力相关。油路的长短影响建立背压力所需的时间,即直接影响压缩机启动时长。

旋叶式压缩机内部的球阀结构位于压缩机气道和油路的结合部位,其作用是缩短油路长度,使压缩机在启动时更快地产生叶片槽背压力。在压缩机启动前期,球阀结构处于开启状态,油可以通过球阀结构更快地进入叶片槽,有助于减小叶片与缸体内壁反复接触碰撞的时长;产生的压力达到一定值后,该机构处于常闭状态。因此,可通过在压缩机内涉及油路的部件设计球阀结构,提升建立背压力的速率,缩短启动噪声时长。

在单品台架测试的压缩机球阀结构仅位于前端板,根据球阀结构特征原理,在后端板、油分离器上设计后球阀结构和油分球阀结构。图5为各类球阀结构示意图。为了在压缩机启动初期提高背压响应速率、缩短叶片伸出时间,对球阀结构进行不同组合,并试验验证各方案在启动过程中噪声时长的控制效果。

经过单品台架6次循环试验,不同球阀结构台架试验结果如表1所示。前球阀结构与后球阀结构相对于单一前球阀结构,启动噪声时间缩短34.7%、

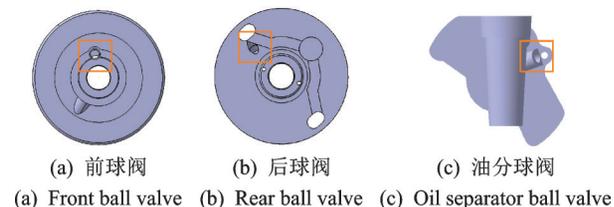


Fig.5 Ball valve structures diagram

前球阀与油分球阀结构相对于单一前球阀结构,启动噪声时间缩短43.9%。通过换装不同球阀结构组合,能够有效缩短压缩机启动噪声时长。

表1 不同球阀结构台架试验结果

Tab.1 Bench test data of different ball valve structures

球阀结构	启动噪声时长控制效果/%
前球阀	—
前球阀+后球阀	34.7
前球阀+油分球阀	43.9

2.2 离合器结构控制启动噪声

电磁离合器是压缩机启动瞬间最先动作的传动部件,其衔铁与压缩机转子在静止状态下处于未贴合状态。在启动瞬间,衔铁与皮带轮之间会产生相位摩擦,同时衔铁与压缩机转子迅速吸合,转子会跟随皮带轮转动。因此,对离合器衔铁结构进行改进,有助于减小叶片伸出的时间与启动噪声时长。图6为各类型离合器衔铁示意图。



(a) Complete cycle rubber (b) Third eyes rubber (c) Bar reed rubber

图6 离合器衔铁示意图

Fig.6 Schematic diagram of clutch armatures

压缩机的球阀结构使用前球阀、后球阀组合结构,通过换装不同的离合器结构,在台架上组合测试离合器衔铁与转子的吸合时间。转子与离合器衔铁的接触状态通过离合器电流、压缩机噪声声压级变化进行辨别,不同离合器结构的吸合时间时域图如图7所示。 t_0 时刻,压缩机启动瞬间,离合器电流迅速增大; t_1 时刻,转子与离合器衔铁吸合时,离合器电流值发生上下波动,噪声达到峰值,由此可计算出离合器吸合时间。

不同离合器结构台架试验结果如表2所示。压缩机球阀结构为前球阀、后球阀组合结构时,三眼橡胶和条形簧片衔铁离合器相比于全周橡胶衔铁离合器,离合器与衔铁吸合时间更小,启动噪声时间分别缩短32.7%和42.2%。通过换装不同离合器结构,能够有效缩短压缩机启动噪声时长。

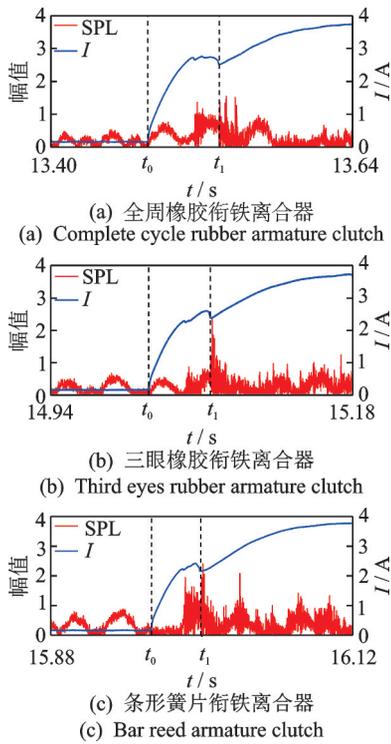


图7 不同离合器结构的吸合时间时域图

Fig.7 Time domain diagram of different clutch structures

表2 不同离合器结构台架试验结果

Tab.2 Bench test data of different clutch structures

离合器结构	离合器吸合时间/s	启动噪声时长控制效果/%
全周橡胶衔铁	0.057	—
三眼橡胶衔铁	0.049	32.7
条形簧片衔铁	0.039	42.2

3 启动噪声实车试验

为了进一步验证旋叶式压缩机球阀结构与离合器结构对启动噪声的控制效果,选择低温怠速启动空调时车外出现有异常噪声的样车,对压缩机空调系统启动噪声进行试验验证,试验样车如图8所示。

环境温度设置为 10℃,发动机保持怠速运行。



图8 试验样车

Fig.8 Test sample vehicle

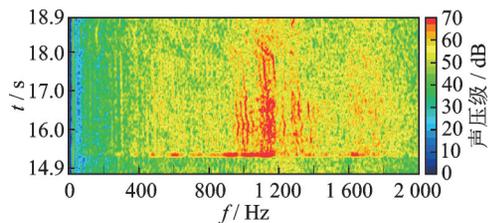
在压缩机本体布置振动传感器,在车外压缩机近场和车内驾驶员右耳处布置麦克风传感器。空调系统高、低压出口处布置振动传感器和脉动传感器,测量加速度信号、噪声信号和脉动压力信号。部分测试传感器位置如图9所示。



图9 测试传感器位置

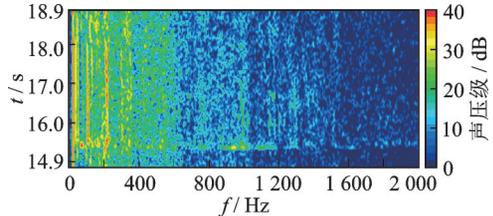
Fig.9 Test sensor position

汽车空调启动过程中实车噪声频谱如图10所示。启动过程中噪声的频率范围主要集中在900~1200 Hz附近,通过车内外频谱图对比分析发现,此频率段在车外容易被识别,车内基本不会被识别。因此,可通过球阀结构、离合器结构对该频率段的车外噪声进行控制。



(a) 车外近场测试噪声频谱

(a) Outside the vehicle near field test noise spectrum



(b) 车内近场测试噪声频谱

(b) In-car near field test noise spectrum

图10 实车噪声频谱

Fig.10 Real vehicle noise spectrum

将配有全周橡胶衔铁离合器的压缩机换装不同组合球阀结构,在整车上单次试验后得到不同球阀结构启动噪声总值如图11所示。

经过整车6次循环试验,压缩机装配不同球阀结构试验数据对比如表3所示。由表3可知,整车试验数据规律与台架试验基本一致。前球阀与后球阀组合结构、前球阀与油分球阀结构相比于单一的前球阀结构对启动噪声时长有明显的控制效果,分别为34.7%和43.9%,且整车测得启动噪声时长均小

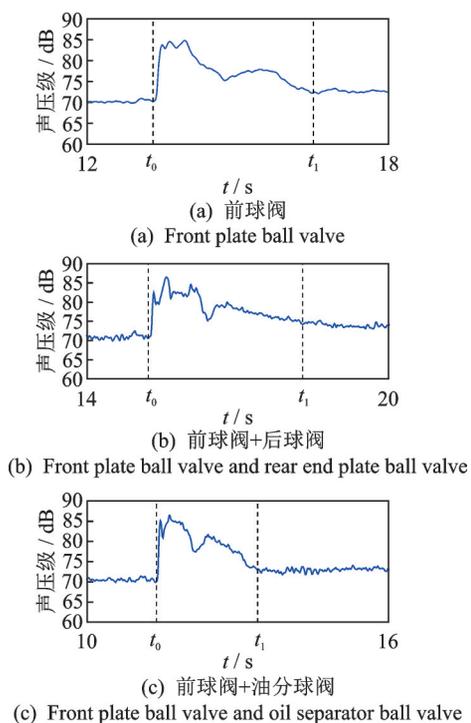


Fig.11 Total value of starting noise of different ball valve structures

表3 不同球阀结构试验数据对比

Tab.3 Comparison of test data of different ball valve structures

球阀结构	启动噪声时长控制效果/%	实车启动噪声时长比台架的减小率/%
前球阀	—	43.0
前球阀+后球阀	34.7	28.0
前球阀+油分球阀	43.9	42.6

于台架启动噪声时长。

将装配前、后球阀组合结构的压缩机换装为不同离合器结构,在实车上单次试验后得到不同离合器结构的启动噪声总值如图12所示。

经过整车6次循环试验,压缩机装配不同离合器结构试验数据对比如表4所示。由表4可知,整车试验数据规律与台架试验基本一致,三眼橡胶衔铁离合器、条形簧片衔铁离合器相比于全周橡胶衔铁离合器对启动噪声时长有明显的控制效果,分别为32.7%和42.2%,且实车测得启动噪声时长均小于台架启动噪声时长。

球阀结构与离合器结构控制方案在整车上得到验证,通过换装不同球阀和离合器结构,能够有效减小旋叶式压缩机1~2 s启动噪声时长。

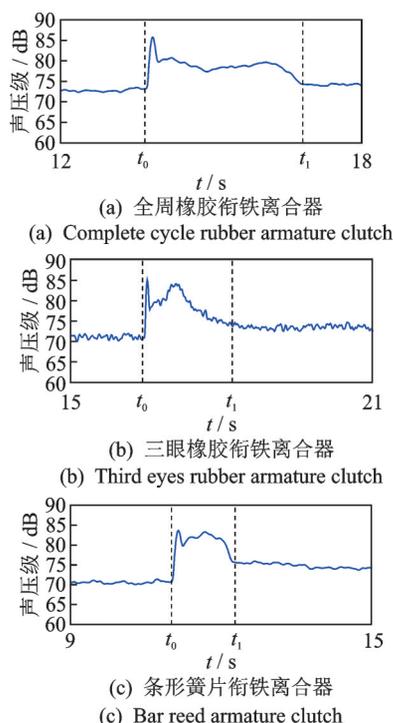


Fig.12 Total value of starting noise of different clutch structures

表4 不同离合器结构试验数据对比

Tab.4 Comparison of test data of different clutch structures

离合器结构	启动噪声时长控制效果/%	实车启动噪声时长比台架的减小率/%
全周橡胶衔铁	—	28.0
三眼橡胶衔铁	32.7	31.9
条形簧片衔铁	42.2	45.1

4 结论

1) 旋叶式压缩机的启动噪声来源为压缩机启动时,离合器与转子吸合以及吸、排气压力和背压力尚未正常产生,叶片与缸体内壁反复接触碰撞的机械激励。

2) 旋叶式压缩机启动噪声是不可避免的固有表征,但能通过改进减小启动噪声时长。在台架上试验时,前、后球阀组合结构、前球阀与离心球阀组合结构相对于单一的前球阀结构,叶片伸出时间分别减小了34.7%和43.9%;三眼橡胶衔铁与条形簧片衔铁离合器相比于全周橡胶衔铁离合器,叶片伸出时间分别减小了32.7%和42.2%。

3) 旋叶式压缩机启动噪声在车外会被识别,但在车内基本不会被识别,不影响乘车舒适性;整车启动噪声时长比台架更小;通过改进的球阀结构与离

合器结构能有效缩短整车启动噪声时长1~2 s。

参 考 文 献

- [1] 李沛然, 邓兆祥, 叶常景. 汽车 NVH 试验数据管理系统关键技术研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 163-166.
LI Peiran, DENG Zhaoxiang, YE Changjing. Research on key technology of vehicle NVH test data management system[J]. Vibration and Shock, 2010, 29(2): 163-166. (in Chinese)
- [2] CHRISTOPHER L. Automotive HVAC hiss noise measurements[J]. Automotive Engineering, 2011, 1(4): 263-271.
- [3] 杨诚, 肖尧, 胡美龙. 小波分析在汽车空调启动异响诊断中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(4): 151-155.
YANG Cheng, XIAO Yao, HU Meilong. Application of wavelet analysis in abnormal sound diagnosis of automobile air conditioner startup[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(4): 151-155. (in Chinese)
- [4] SONG L Q, ZENG L P, ZHOU J D, et al. Profile design for the cylinder of a double-acting rotary vane compressor [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 23(13): 2300-2313.
- [5] 何泽银, 杨金明, 范爱军, 等. 旋叶式压缩机叶片动态接触激励机理[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 78-86.
HE Zeyin, YANG Jinming, FAN Aijun, et al. Mechanism of vane dynamic contact excitation in rotary vane compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 78-86. (in Chinese)
- [6] 陈文卿, 沈九兵, 严思远, 等. 半封闭变频螺杆制冷压缩机降噪方法及试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 188-195.
CHEN Wenqing, SHEN Jiubin, YAN Siyuan, et al. Noise reduction method and experiment of semi-enclosed variable frequency screw refrigeration compressor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 188-195. (in Chinese)
- [7] 谭龙龙, 吴群, 吕岩, 等. 离心式压缩机噪声源定位分析及降噪方法[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 32-36, 53.
TAN Longlong, WU Qun, LÜ Yan, et al. Noise source location analysis and noise reduction method of centrifugal compressor [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 32-36, 53. (in Chinese)
- [8] 张荣婷, 黄辉, 胡余生, 等. 变频压缩机低频周期性噪声的分析[J]. 流体机械, 2016, 52(6) 51-55.
ZHANG Rongting, HUANG Hui, HU Yusheng, et al. Analysis of low frequency periodic noise of variable frequency compressor[J]. Fluid Machinery, 2016, 52(6): 51-55. (in Chinese)
- [9] 常晶晶, 丁康, 李永焯. 车内空调压缩机异响的控制实验[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(6): 206-209.
CHANG Jingjing, DING Kang, LI Yongzhuo. Control experiment of abnormal sound of air conditioner compressor in car[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(6): 206-209. (in Chinese)
- [10] 杨诚, 赖天华, 周晓斌, 等. 基于快速诊断的空调系统引起车内异响研究[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 155-158.
YANG Cheng, LAI Tianhua, ZHOU Xiaobin, et al. Research on abnormal noise caused by air conditioning system based on rapid diagnosis[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3): 155-158. (in Chinese)
- [11] 商国旭, 史文库, 陈志勇, 等. 基于压缩机-支架系统的异常噪声研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(5): 936-940.
SHANG Guoxu, SHI Wenku, CHEN Zhiyong, et al. Abnormal noise research based on compressor-support system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(5): 936-940. (in Chinese)
- [12] 陈志勇, 毛阳, 史文库, 等. 汽车空调压缩机噪声异常问题的诊断与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1063-1067.
CHEN Zhiyong, MAO Yang, SHI Wenku, et al. Diagnosis and test of abnormal noise of automobile air conditioner compressor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1063-1067. (in Chinese)
- [13] HE Z L, LI D T, HAN Y X, et al. Noise control of a twin-screw refrigeration compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 124: 30-42.
- [14] SHEN J B, CHEN W Q. Study on the noise reduction methods for a semi-hermetic variable frequency twin-screw refrigeration compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 125: 1-12.
- [15] MAO Y J, FAN C, ZHANG Z P, et al. Control of noise generated from centrifugal refrigeration compressor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107466.



第一作者简介:曹昱坤,男,1985年2月生,工程师。主要研究方向为汽车振动噪声分析与控制。

E-mail: 13983602867@163.com

通信作者简介:何泽银,男,1985年8月生,博士、教授。主要研究方向为机械系统动力学。

E-mail: zeyin_he@126.com