

# 制冷压缩机配管系统模态分析及振动特性

孔祥强, 陈丽娟, 郑 瑞, 李 瑛  
(山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590)

**摘要:** 为了减小制冷压缩机运行过程中配管系统的振动, 采用 Pro/Engineer 软件建立制冷压缩机配管系统和管道内部气柱的三维实体模型, 然后利用有限元分析软件 ANSYS 分别对配管系统和管道内部气柱进行结构模态分析和声学模态分析, 得到配管系统和管道内部气柱的前 6 阶固有频率。计算结果表明: 配管系统的 4 阶固有频率与压缩机激发频率非常接近, 会发生共振; 而管道内部气柱的固有频率不在共振区内, 不会发生共振。基于此, 研究了回气管长度、排气管长度和固定支撑数目对制冷压缩机配管系统振动的影响特性。模态分析结果表明: 随着回气管和排气管长度的减小, 制冷压缩机配管系统和管道内部气柱的各阶固有频率逐渐增大; 当回气管长度设计取值合理时, 配管系统和管道内部气柱的固有频率能够有效避开共振区, 共振不会发生; 随着排气管长度的减小或固定支撑数目的增加, 配管系统的固有频率逐渐远离共振区, 有利于避免共振发生, 且设置 2 个固定支撑较为合理。模拟结果与文献试验比较吻合一致。

**关键词:** 制冷压缩机; 配管; 振动; 模态分析; 固有频率

中图分类号: TB 535

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)06-0825-07

doi: 10.11936/bjntxb2015050059

## Vibration Characteristics and Modal Analysis for the Pipe System Connected to a Refrigeration Compressor

KONG Xiangqiang, CHEN Lijuan, ZHENG Rui, LI Ying

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** To reduce the vibration during the operation of air conditioner, geometric models of the pipe system connected to refrigeration compressor and the gas column in pipe system were created by Pro/Engineering software, and the modal analysis based on ANSYS software was carried out to obtain the first six-order natural frequencies of the pipe system and the gas column. Results show that the fourth natural frequency of the pipe system is very close to the compressor excitation frequency, and resonance occurs. Because the natural frequencies of the gas columns in suction pipe and discharge pipe are not in the resonance region, the gas columns in the suction pipe and discharge pipe cannot resonate. For the problem of pipe system resonance, the vibration characteristics of the pipe system with different lengths of the suction pipe, different lengths of discharge pipe and fixed supporting number are analyzed. The modal analysis results show that the natural frequencies of the pipe system and the gas column in the pipe system increase with the decrease of suction pipe length and discharge pipe length. When the rational value of the suction pipe length is taken, the natural frequencies of the pipe system and the gas column are not in resonance region, and resonance cannot occur. With the decrease of discharge pipe length and the

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEM018); 青岛市黄岛区科技项目(2014-I-40)

作者简介: 孔祥强(1976—), 男, 副教授, 主要从事制冷空调技术方面的研究, E-mail: kxqiangly@126.com

increase of the fixed supporting number, the natural frequency of the pipe system gradually gets far away from the resonance region, which is beneficial to avoid resonance. Additionally, it is reasonable to set two fixed supportings for the pipe system if considering the convenience for operation and economic condition. Simulation results accord with the reported experiment results.

**Key words:** refrigeration compressor; pipe system; vibration; modal analysis; natural frequency

制冷压缩机是空调室外机噪声的主要来源<sup>[1-2]</sup>, 对其结构进行优化设计, 能够有效降低压缩机噪声. 李春银等<sup>[3]</sup> 为了降低制冷压缩机排气阀片往复运动产生的振动噪声, 采取提高限位板高度或限制阀片振幅的措施降低了压缩机噪声. 仇颖等<sup>[4]</sup> 采用理论分析的方式研究了制冷压缩机腔内排气消声器的声学性能, 得到增加腔体长度能够改善消声器对压缩机噪声的降噪效果. Park 等<sup>[5]</sup> 提出一种在线扰动滤波的主动控制技术, 有效抑制了空调室外机内部制冷压缩机产生的噪声.

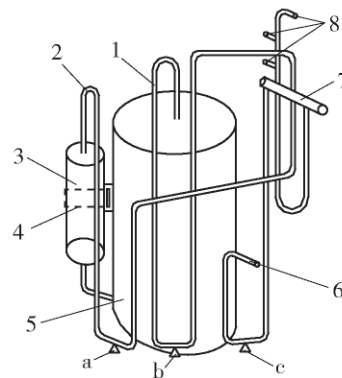
橡胶垫、支架等是制冷压缩机振动和噪声的传递路径, 因此, 对它们进行优化也能使压缩机振动噪声得到控制. 李树森等<sup>[6]</sup> 将选频隔振技术应用于压缩机减振设计, 结果表明在压缩机和空调器底板之间选用黏弹性高的阻尼材料隔振垫, 能够有效降低压缩机振动. 李保泽等<sup>[7]</sup> 研究了减振垫硬度值对整个制冷压缩机及配管系统固有频率的影响, 获得了橡胶垫的最佳刚度值, 使得制冷压缩机及其配管系统的振动减小. 何吕昌等<sup>[8]</sup> 针对压缩机剧烈振动的问题, 采用增强材料的措施提高了压缩机支架的整体刚度, 进而有效避免了共振现象的发生.

此外, 与压缩机相连的配管系统也是压缩机振动噪声的重要传递路径<sup>[9-10]</sup>. 近年来, 国内外对制冷压缩机配管系统振动特性的研究较少, 同时考虑制冷压缩机配管系统和管道内部气柱振动特性的文献还鲜有报道. 模态分析能够计算出结构系统的固有频率, 进而得到系统的振动特性<sup>[11]</sup>. 因此, 本文采用有限元分析软件 ANSYS 分别对制冷压缩机配管系统及管道内部的气柱进行模态分析, 获得配管系统和管道内部气柱的前 6 阶固有频率, 并分析配管结构参数对制冷压缩机配管系统振动的影响特性.

## 1 制冷压缩机配管系统

制冷压缩机及配管系统在空调室外机内部的布置如图 1 所示, 主要由压缩机、气液分离器、排气管、回气管、四通阀、冷凝器入口管和蒸发器出口管等组成. 由于气液分离器与压缩机壳体通过弹簧箍紧固

连接, 故把压缩机和气液分离器视为一个整体. 回气管、排气管、四通阀、冷凝器入口管和蒸发器出口管等构成了制冷压缩机配管系统. 制冷压缩机采用滚动转子式压缩机, 正常运转时额定转速为 3 000 r/min, 排气压力为 2.7 MPa, 排气温度为 80 °C, 吸气压力为 0.8 MPa, 吸气温度为 15 °C; 制冷管道材料为紫铜管, 弹性模量为  $1.23 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比为 0.34, 密度为 8 940 kg/m<sup>3</sup>; 排气管的内径为 6.44 mm, 外径为 7.94 mm; 回气管的内径为 8.12 mm, 外径为 9.52 mm; 冷凝器入口管的内径为 4.95 mm, 外径为 6.35 mm; 配管系统内部制冷剂为 R410A.



1—排气管; 2—回气管; 3—气液分离器; 4—弹簧箍; 5—压缩机; 6—蒸发器出口管; 7—四通阀; 8—冷凝器入口管.

图 1 制冷压缩机及配管系统结构

Fig. 1 Schematic of the refrigeration compressor and pipe system

其中, 制冷压缩机配管系统的各部分管道长度如图 2 所示, 单位为 mm. 图中未标注的圆角半径均为 20 mm.

由图 1 可知, 制冷压缩机配管系统振动的激发源为压缩机, 压缩机激发频率的计算式为

$$f_{ex} = \frac{Nm}{60} \quad (1)$$

式中:  $f_{ex}$  为压缩机激发频率;  $N$  为压缩机转速;  $m$  为压缩机的作用方式, 对于单级制冷压缩机  $m$  取 1.

由此计算得出压缩机激发频率为 50 Hz. 当管道固有频率落在共振区 (0.8 ~ 1.2 倍  $f_{ex}$ ) 时, 管道将

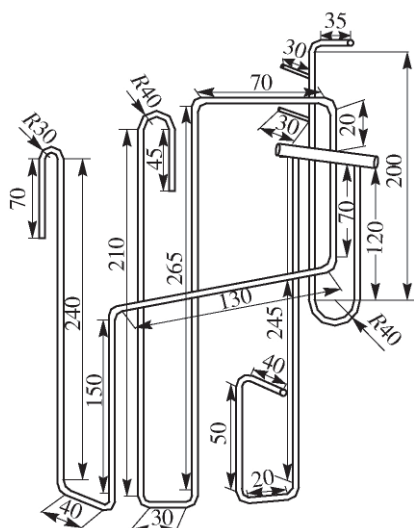


图 2 配管系统的各部分管道长度

Fig. 2 Length of each section of pipe system (mm)

发生机械共振,产生剧烈振动<sup>[12]</sup>.

## 2 配管系统模态分析数学模型的建立

管道系统发生共振包括同时存在的 2 个振动系统,即管道系统发生结构共振和管道系统发生气柱共振<sup>[13]</sup>. 制冷压缩机配管系统受到压缩机的激振处于受迫振动状态,当压缩机激发频率和配管系统的固有频率相近或相等时,制冷压缩机配管系统将产生共振,造成管道的强烈振动. 配管内部充满的制冷剂气体称为气柱,气体可以压缩膨胀,故可以把气柱看成一个具有连续质量的弹簧振动系统,当发生气柱共振时,气流脉动幅度显著提高,从而引起制冷压缩机配管系统的强烈振动.

因此,在制冷压缩机配管系统的设计过程中,必需同时考虑配管系统和管道内部气柱的振动特性,使两者的固有频率都远离压缩机激发频率,制冷压缩机配管系统才能有效避开共振.

### 2.1 制冷压缩机配管系统固有频率计算数学模型

制冷压缩机配管系统的振动微分方程<sup>[14]</sup>为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (2)$$

式中:  $M$ 、 $K$  和  $C$  分别为制冷压缩机配管系统的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵;  $X$ 、 $F$  分别为振动位移和强迫激励.

如果式(2)中的  $C$  和  $F$  均为 0,即管道固有频率的数学模型为

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (3)$$

### 2.2 管道内部气柱固有频率计算数学模型

管道内部气柱固有频率常采用转移矩阵法进行

计算,但转移矩阵法是建立在一维数学模型的基础上,有限元法能够有效计算复杂气柱的固有频率<sup>[15]</sup>. 制冷压缩机配管系统较为复杂,因此,本文利用有限元方法计算制冷压缩机配管系统内部气柱固有频率.

对于制冷压缩机配管系统内部的制冷剂,做如下假设: 1) 制冷剂气体无黏性、可压缩; 2) 制冷剂气体的平均密度、平均压力和平均速度均为定值; 3) 制冷剂内部传播小振幅声波; 4) 忽略制冷剂运动过程中的能量损耗和热传导,仅考虑气体脉动.

管道内部气柱声学波动方程<sup>[16]</sup>为

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (4)$$

式中:  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子;  $c$  为气体的声速;  $P$  为气体的声压;  $t$  为时间.

应用微分方程的等效积分形式并结合加权余量法的伽辽金(Galerkin)法,对管道内部气柱振动系统建立有限元方程

$$M\ddot{P} + KP = F \quad (5)$$

式中:  $M$ 、 $K$  分别为气柱的质量和刚度矩阵;  $P$  为压力向量;  $F$  为管道内部气柱所荷载荷矩阵.

如果式(5)中的  $F$  为 0,即管道气柱固有频率的数学模型为

$$M\ddot{P} + KP = 0 \quad (6)$$

## 3 制冷压缩机配管系统的模态分析

在 Pro/Engineer 中建立制冷压缩机配管系统的三维实体模型,然后将其导入到有限元分析软件 ANSYS,由于压缩机配管系统为薄壁结构,为了减少计算量,因此,采用 Shell63 单元对其进行网格划分. 在数值模拟中,配管系统的排气口管端、回气口管端、冷凝器入口管端及蒸发器出口管端处均施加固定约束. 采用子空间迭代(Subspace)法对制冷压缩机配管系统进行模态求解,求得配管系统的前 6 阶固有频率值如表 1 所示.

表 1 配管系统固有频率

Table 1 Natural frequency of pipe system

| 阶次      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 固有频率/Hz | 32.53 | 35.88 | 39.13 | 48.97 | 57.57 | 90.89 |

由表 1 可知,配管系统的固有频率值大部分落在低频范围内,对避开共振是不利的. 配管系统的

4阶固有频率48.97 Hz和压缩机激发频率50 Hz非常接近,这使得配管系统易发生共振,产生剧烈的管道振动,其对应的振型如图3所示.可知,当配管系统发生共振时,图1所示位置a处的U形管底部振动最为剧烈.基于此,本文分析回气管长度、排气管长度及固定支撑数目对制冷压缩机配管系统固有频率的影响特性,通过合理选择配管系统的结构参数,避免或防止共振现象的发生.另外,固有频率是配管系统的固有属性,它的大小只与配管系统的结构参数相关,和外部作用力无关,而压缩机对配管系统的周期性激作用力为外部载荷,因此本文获得的配管系统结构参数对配管系统固有频率的影响特性对于不同类型的压缩机具有通用性.

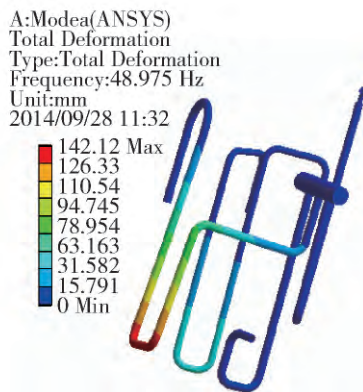
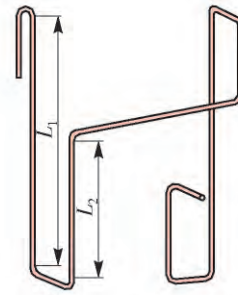


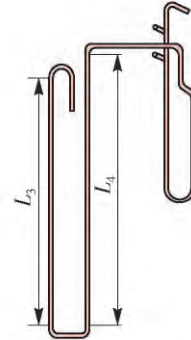
图3 配管系统4阶固有频率对应的振型

Fig. 3 Vibration model of pipe system at fourth order natural frequency

在对制冷压缩机配管系统进行改进时,除使配管系统的固有频率远离压缩机激发频率外,还应同时考虑配管系统内部气柱的固有频率,使其也远离激发频率.回气管和排气管内部气柱如图4所示,将制冷剂气体流经四通阀部位进行了简化.本文采用ANSYS软件分别对排气管内部气柱和回气管内部气柱进行模态分析,采用Fluid30单元,声速为225 m/s.计算过程中,对于排气管内部气柱,压缩机侧排气管端面施加2.7 MPa的压力载荷,温度为80℃;对于回气管内部气柱,压缩机侧回气管面端施加0.8 MPa的压力载荷,温度为15℃.计算结果如表2所示.由表可知,回气管和排气管内部气柱的固有频率均不在共振区内.因此,不会发生气柱共振,配管内部制冷剂气体脉动幅度不大,从而避免了制冷压缩机配管系统剧烈振动.



(a) 回气管气柱



(b) 排气管气柱

图4 回气管和排气管气柱模型

Fig. 4 Schematic diagram of gas column in the pipe system

表2 配管内部气柱固有频率

Table 2 Natural frequency of gas column in the pipe system

| 阶数         | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 回气管内部气柱/Hz | 60 | 162 | 170 | 378 | 487 | 593 |
| 排气管内部气柱/Hz | 68 | 205 | 342 | 479 | 616 | 754 |

### 3.1 回气管长度对配管系统固有频率的影响

将图4(a)中所示的回气管直管段长度 $L_1$ 和 $L_2$ 分别取值为原始值、各减少50 mm、各减少100 mm、各减少150 mm,即 $L_1$ 和 $L_2$ 分别为240、150 mm,190、100 mm,140、50 mm,90、0 mm四组不同的数据.模拟结果如图5所示.可以看出,配管系统的各阶固有频率随着 $L_1$ 和 $L_2$ 的减小逐渐增大.当 $L_1$ 和 $L_2$ 为190、100 mm时,配管系统的各阶固有频率都避开了共振区,共振不会发生;当 $L_1$ 和 $L_2$ 为140、50 mm或 $L_1$ 和 $L_2$ 为90、0 mm时,虽然配管系统的4阶固有频率避开了共振区,但其三阶固有频率又落在了共振区内,仍会发生共振.因此,在制冷压缩机配管系统设计中应合理选择回气管长度值,使配管系统的各阶固有频率与压缩机激发频率错开,以免共振现象的发生.

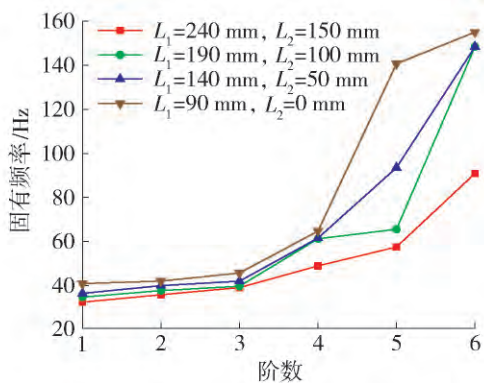


图 5 回气管长度对配管系统固有频率的影响  
Fig. 5 Effect of suction pipe length on natural frequency of the pipe system

回气管长度的变化,也改变了回气管内部的气柱,气柱的固有频率也将随之发生改变。为了避免回气管内部制冷剂气体发生共振,产生强烈的气流脉动,对回气管内部气柱的固有频率进行模态分析,计算结果如图 6 所示。由图可知,随着  $L_1$  和  $L_2$  的减小,回气管内部气柱的固有频率逐渐增大,均在共振区外,因此,不会发生气柱共振。

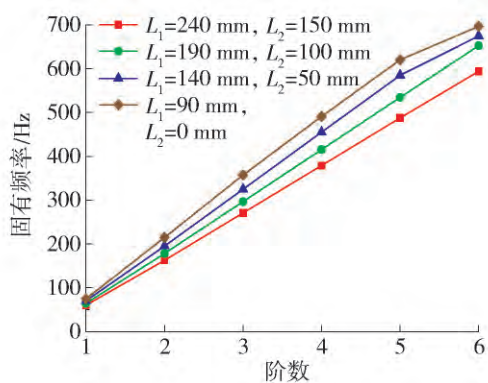


图 6 回气管长度对回气管内部气柱固有频率的影响  
Fig. 6 Effect of suction pipe length on natural frequency of gas column in the pipe system

### 3.2 排气管长度对配管系统固有频率的影响

将图 4(b) 中所示的排气管直管段长度  $L_3$  和  $L_4$  分别取值为原始值、各减少 50 mm、各减少 100 mm、各减少 150 mm,即  $L_3$  和  $L_4$  分别为 210、265 mm, 160、215 mm, 110、165 mm, 60、115 mm 四组不同的数据,模拟结果如图 7 所示。由图可以看出,随着  $L_3$  和  $L_4$  减小,配管系统的各阶固有频率逐渐增大;当  $L_3$  和  $L_4$  减小为 110、165 mm,配管系统的各阶固有频率刚刚避开共振区,而当  $L_3$  和  $L_4$  减小为 60、115 mm 时,制冷压缩机配管系统各阶固有频率大大增加,远离压缩机激发频率,不会发生共振。因此,为

了避免配管系统发生剧烈振动,应尽量减小排气管的长度。

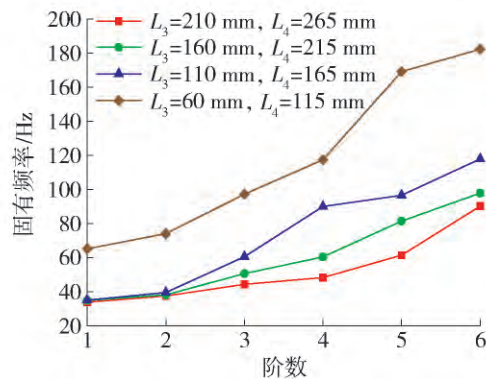


图 7 排气管长度对配管系统固有频率的影响  
Fig. 7 Effect of discharge pipe length on natural frequency of the pipe system

改变排气管后,排气管内部气柱固有频率的计算结果如图 8 所示。可知,随着  $L_3$  和  $L_4$  减小,排气管内部气柱的固有频率逐渐增大。当  $L_3$  和  $L_4$  为 60、115 mm 时,排气管内部气柱的固有频率也大大增加,远离压缩机激发频率,不会发生气柱共振。

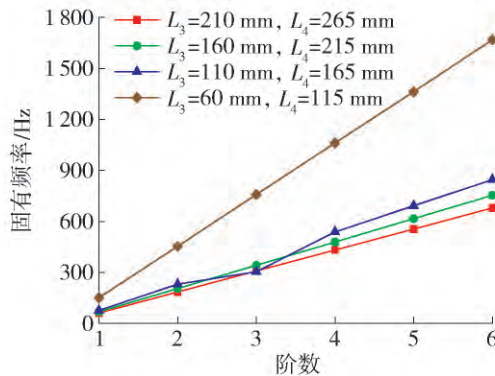


图 8 排气管长度对排气管内部气柱固有频率的影响  
Fig. 8 Effect of discharge pipe length on natural frequency of gas column in the pipe system

### 3.3 固定支撑数目对配管系统固有频率的影响

在图 1 中位置 a 处设置固定支撑,位置 a、b 处设置固定支撑,位置 a、b、c 处设置固定支撑,模拟计算结果如图 9 所示。由图可知,随着固定支撑个数的增加,配管系统的各阶固有频率逐渐增大。在位置 a 处设置固定支撑时,虽然制冷压缩机配管系统的 4 阶固有频率不在共振区内,但其 3 阶固有频率接近压缩机激发频率,仍会发生共振;在位置 a、b 处设置固定支撑或位置 a、b、c 处设置固定支撑,配管系统的固有频率大大增加,远离压缩机激发频率,避

免了共振现象的发生. 并且,随着固定支撑个数的增加,配管系统的各阶固有频率增加的幅度减小. 因此,在本文所设计的工况下,综合考虑操作的方便性和经济性,在位置 a、b 处设置固定支撑较为合理.

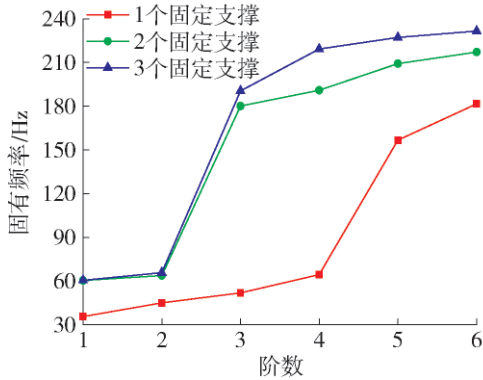


图9 固定支撑数目对配管系统固有频率的影响  
Fig.9 Effect of fixed supporting number on natural frequency of the pipe system

#### 4 试验验证

薛玮飞等<sup>[17]</sup>针对制冷压缩机配管系统共振的问题,采取去掉排气管和回气管 U 形管的措施,使得配管系统的长度减小,然后对改进前后的配管系统进行振动位移测试,改进后配管系统振幅较原配管大幅度降低. 金涛等<sup>[18]</sup>针对空调配管发生共振导致管道断裂的问题,对回气管进行优化设计,使得配管系统的各阶固有频率避开压缩机工作频率,而后依据优化配管设计方案研制试验样机,并进行振动测试,结果表明:采取减小回气管长度的措施能够有效避免配管系统发生共振,且使配管所受应力减小. 上述试验研究表明:减小管道长度能够有效降低振动,这与本文研究获得的减小排气管长度或回气管长度能够有效抑制制冷压缩机配管系统振动的结论一致,从而验证了本文模态分析结论的正确性.

#### 5 结论

1) 为了避免由于制冷压缩机激发频率和制冷压缩机配管系统的固有频率相近而导致共振现象的发生,本文采用 ANSYS 的模态分析计算了制冷压缩机配管系统和管道内部气柱的固有频率,得出配管系统的 4 阶固有频率 48.97 Hz 和压缩机激发频率 50 Hz 接近,这使得配管系统很容易发生共振,产生剧烈的管道振动.

2) 随着回气管长度和排气管长度的减小,制冷压缩机配管系统和管道内部气柱的固有频率增大.

3) 当回气管长度设计取值合理时,制冷压缩机配管系统和管道内部气柱的各阶固有频率能够有效避开共振区,共振不会发生. 本文所设定的工况下,回气管直管段长度  $L_1$  和  $L_2$  分别为 190、100 mm 时较为合理.

4) 为了控制制冷压缩机配管系统共振现象的发生,应尽量减少排气管的长度. 本文将排气管直管段长度  $L_3$  和  $L_4$  由 210、265 mm 分别减至 60、115 mm 时,有效避免了配管系统的剧烈振动.

5) 为了避免制冷压缩机配管系统发生共振,应适当增加固定支撑的数目. 本文所设定的工况下,增加 2 个固定支撑较为合理.

#### 参考文献:

- [1] LEE U Y, KIM B J, LEE J B, et al. Design optimization of an accumulator for noise reduction of rotary compressor [J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2011, 35(7): 759-766.
- [2] KIM H C, CHO M G, KIM J, et al. Coherence technique for noise reduction in rotary compressor [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7): 2073-2076.
- [3] 李春银, 王树林. 汽车空调旋叶式压缩机排气阀片的振动特性 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 186-191.  
LI C Y, WANG S L. Vibration behavior of a discharge valve for vane compressor of a car air conditioner [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8): 186-191. (in Chinese)
- [4] 仇颖, 李红旗, 吕亚东. 活塞式制冷压缩机吸排气消声腔的声学分析和测量 [J]. 流体机械, 2006, 34(11): 16-48.  
QIU Y, LI H Q, LÜ Y D. Acoustics analysis on suction and discharge cavity in hermetic reciprocating compressor [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(11): 16-48. (in Chinese)
- [5] PARK C S, KIM S, PARK G G, et al. Active mechanical vibration control of rotary compressors for air-conditioning systems [J]. Journal of Power Electronics, 2012, 12(6): 1003-1010.
- [6] 李树森, 王开和, 许玮. 空调器压缩机选频隔振减振降噪研究 [J]. 噪声与振动控制, 2003, 23(3): 27-30.  
LI S S, WANG K H, XU W. Research on noise and vibration reduction of compress of conditiner [J]. Noise and Vibration Control, 2003, 23(3): 27-30. (in Chinese)
- [7] 李保泽, 范颖涛. 空调室外机减振垫对振动和噪声影响的研究 [J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(2): 45-49.

- LI B Z, FAN Y T. Study on the impact of shock absorber on vibration and noise of air-condition's outdoor unit [J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, 30(2): 45-49. (in Chinese)
- [8] 何吕昌,左曙光,申秀敏,等. 基于空调压缩机支架改进的燃料电池轿车降噪[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(3): 339-343.
- HE L C, ZUO S G, SHEN X M, et al. Noise reduction based on frame improvement of air-condition of fuel cell vehicle [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(3): 339-343. (in Chinese)
- [9] LIM S T, JOO K H, AHN H N, et al. Transfer characteristics of vehicle air condition' booming noise [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(6): 2025-2031.
- [10] LEE U Y, KIM B J, LEE J B, et al. Design optimization of an accumulator for noise reduction of rotary compressor [J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 2011, 35(7): 759-766.
- [11] 王民,张新云,笪涛,等. 基于 ANSYS 的国产数控机床高速电主轴的仿真分析[J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(7): 988-991.
- WANG M, ZHANG X Y, ZAN T, et al. Investigation of static electric spindle based on ANSYS [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(7): 988-991. (in Chinese)
- [12] 徐斌,冯全科,余小玲. 压缩机复杂管路压力脉动及管道振动研究[J]. *核动力工程*, 2008, 29(4): 79-83.
- XU B, FENG Q K, YU X L. Study on pressure pulsation and piping vibration of complex piping of reciprocating compressor [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(4): 79-83. (in Chinese)
- [13] 党锡其,陈守五. 活塞式压缩机气流脉动与管道振动[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1984: 1-6.
- [14] 郭福祥,史文库,王世朝,等. 轻型卡车驾驶室悬置系统优化匹配设计[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(3): 347-352.
- GUO F X, SHI W K, WANG S C, et al. Match and optimization of a light truck cab mount system [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(3): 347-352. (in Chinese)
- [15] 刘博想,冯健美,王玉莉,等. 利用亥姆兹共鸣器减弱压缩机阀腔内压力脉动的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(5): 85-90.
- LIU B X, FENG J M, WANG Y L, et al. Study on damping the pressure pulsation in the valve chamber of reciprocating compressor using the helmholtz resonator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(5): 85-90. (in Chinese)
- [16] 盛美萍,王敏庆,孙进才. 噪声与振动控制技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 33-41.
- [17] 薛玮飞,张智,陈进,等. 空调配管空间结构的动态仿真与优化[J]. *机械强度*, 2011, 33(2): 170-174.
- XUE W F, ZHANG Z, CHEN J, et al. Dynamical simulation and optimum design used for air conditioner pipe [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(2): 170-174. (in Chinese)
- [18] 金涛,陈建良,赵科. 空调管路系统动态仿真及优化设计[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(1): 117-120.
- JIN T, CHEN J L, ZHAO K. A simulation and test system used for air conditioner pipe optimum design [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(1): 117-120. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)