

直线冰箱压缩机的频率特性

张金权, 畅云峰, 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了开发高性能、高可靠性的直线冰箱压缩机, 从理论上分析了影响直线压缩机固有频率的因素, 通过实验研究了直线压缩机在不同排气压力和工作频率下的工作特性. 研究表明: 直线压缩机的固有频率不仅与运动组件质量和弹簧刚度有关, 还受到排气压力及活塞行程的影响, 随排气压力的增大而增大; 在不同的排气压力和活塞行程下, 当工作频率接近固有频率时, 压缩机的工作电流和输入功率最小, 压缩机效率最高, 工作可靠稳定. 在设计直线冰箱压缩机时, 为了使其高效、可靠稳定地运行, 应保证额定运行工况下的固有频率与工作频率相等.

关键词: 直线压缩机; 固有频率; 工作频率

中图分类号: TH457; TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0277-04

Study on Frequency Characteristics of Linear Refrigerator Compressor

ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng, XING Ziwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to design high performance and reliability linear refrigerator compressors, the factors influencing the natural frequency of the linear compressor were analyzed theoretically, and experimental study on operating characteristics of different discharge pressure and operation frequency were conducted. The results show that the natural frequency of the linear compressor is influenced by not only mass of moving parts and spring stiffness but also discharge pressure and piston stroke, and the natural frequency increases with the discharge pressure. At the different discharge pressure and operation frequency, the compressor has the minimum working current and input power, and higher efficiency when the operation frequency being close to the natural frequency. In designing the linear refrigerator compressor, the operation frequency should be equal to the natural frequency at the rated operating condition for obtaining high performance of the linear compressor.

Keywords: linear compressor; natural frequency; operation frequency

直线冰箱压缩机是一种由直线电机直接驱动活塞做往复直线运动的新型高效制冷压缩机, 其虽然具有效率高的优势, 但由于频率匹配难、活塞位移控制难、电机优化设计难等因素的制约, 使其效率很难提高.

近年来, 国内外各大研究机构相继开展对直线冰箱压缩机的研究, 以韩国 LG 公司和美国 Sun-power 公司最为突出, 主要集中在理论模型模拟、活塞自传感控制、电机优化及整机优化设计上. 文献

[1]对家用直线冰箱压缩机的研究现状及发展趋势进行了阐述. 文献[2]对制冷工质为 R134a 的直线冰箱压缩机的电机、活塞位移控制及性能进行了研究. 文献[3]对一种对动式动圈直线压缩机驱动的斯特林制冷机的频率特性进行了研究, 结果发现直线压缩机的活塞直径对固有频率影响最大, 调节运动部件的质量是改变固有频率最有效的方式, 排气压力影响着制冷机的共振特性. 文献[4]对家用直线冰箱压缩机进行了理论模拟及实验研究. 文献[5]对直

线压缩机的频率特性进行了研究,但没有考虑气体弹簧对固有频率的影响。

在直线冰箱压缩机的优化设计过程中,固有频率是直线压缩机的重要技术参数,其直接影响活塞组件的质量和弹簧刚度,其与工作频率的合理匹配直接影响压缩机的性能和寿命。为了提高直线压缩机的整体性能及寿命,很有必要对其频率特性进行研究,合理匹配系统的工作频率与固有频率,优化设计压缩机的技术参数。本文主要对一种由动磁直线电机驱动的冰箱压缩机的频率特性进行理论和实验研究。

1 直线压缩机固有频率分析

直线压缩机机械系统可简化为图1所示的单质量、单自由度的受迫阻尼振动模型,其中运动活塞组件受到以下各力作用:惯性力、电机推力、气体力、弹簧力及阻尼力,其活塞运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + K_s(x - x_0) + p_r A_p = ai \quad (1)$$

式中: x 为活塞的位移; x_0 为活塞的初始平衡位置; m 为运动活塞组件的质量; K_s 为机械弹簧的刚度系数; A_p 为活塞的有效截面积; p_r 为压缩腔气体的相对压力; a 为直线电机的机电转化常数; i 为流经线圈的电流; c 为系统的等效阻尼系数,包括电磁阻尼、机械阻尼和压缩腔当量气体阻尼3部分,实验研究表明其值随着活塞行程的变化而变化,可通过实验的方法测得^[6],对实验数据进行线性拟合^[7]后简化为

$$c = 2S + 10.7 \quad (2)$$

其中 S 为活塞行程。

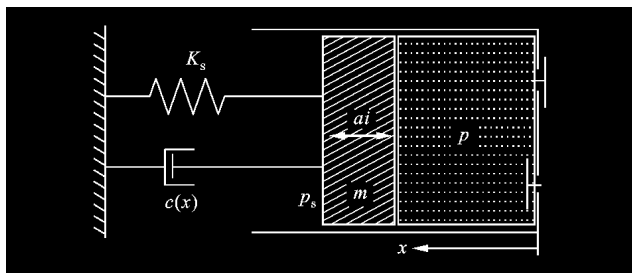


图1 直线压缩机机械系统模型

假设直线压缩机的气体力是线性的,则系统的固有频率可表示为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(K_s + K_g)(1 - \xi^2)}{m} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: K_g 为工作腔气体的等效刚度; ξ 为归一化的相对阻尼系数,可表示为

$$\xi = \frac{c}{2(K_s m + K_g m)^{1/2}} \quad (4)$$

假设工作腔气体工作为绝热过程,进排气过程无脉动及压力损失,则工作腔气体的等效刚度可对活塞位移 x 求导得出,其为

$$\left. \begin{aligned} K_g &= 0 & p &= p_s \\ K_g &= \frac{\partial(p_r A_p)}{\partial x} = A_p \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{n p A_p}{x} & p_s &\leq p \leq p_d \\ K_g &= 0 & p &= p_d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: n 为绝热指数; p 为压缩腔内的气体压力; p_s 为名义吸气压力; p_d 为名义排气压力。

工作腔气体的等效刚度可近似为

$$K_g = \frac{\beta p_d A_p}{S} \quad (6)$$

式中: β 为气体弹簧刚度等效系数,对于不同的压缩介质其取值不同,一般取值范围为0.5~0.8。

系统固有频率为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_s}{m} + \frac{\beta p_d A_p}{mS} - \left(\frac{S + 5.35}{m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

由式(7)可知,系统的固有频率与活塞运动组件的质量、活塞的行程和截面积、弹簧刚度及排气压力有关。

2 实验装置

如图2所示,用来研究直线冰箱压缩机频率特性的实验装置主要由功率驱动模块、位移传感器、数据采集系统、数字存储示波器、压力表及流量计等组成。功率驱动模块由变频电源、三端双向可控硅驱动电路板及功率表组成,用来控制直线压缩机的工作频率、输入电压和电流。位移传感器用来测量压缩机活塞的位移信号,并通过数据采集卡进行采集。数字存储示波器用来采集直线电机两端的电压和电流信号,为了对压缩机的活塞运动进行测控,利用虚拟仪器软件(Labview™)开发了直线压缩机位移测控系统,通过调整三端双向可控硅的导通时间来控制活塞行程和上死点位置。

由于受到测试条件的限制,实验中使用空气代替制冷工质作为压缩介质进行频率特性研究,其结果对于直线冰箱压缩机的频率设计有一定的借鉴意义。实验中的直线冰箱压缩机主要技术参数如表1所示。

表1 直线压缩机主要技术参数

m/kg	$K_s/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	n	A_p/m^2	$a/\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$	p_s/MPa	x_0/m
0.62	693 70	1.38	0.000 71	70	0.1	0.008

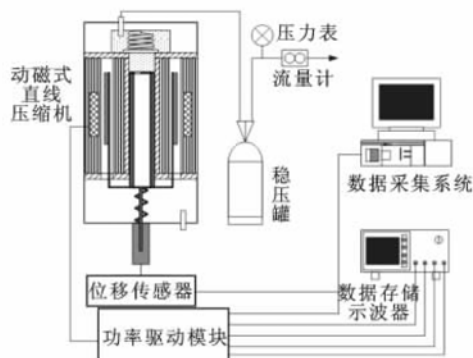


图2 实验装置系统图

3 结果与讨论

对于直线冰箱压缩机而言,其排气压力和活塞行程会随冰箱内环境温度的变化而变化,导致压缩机的固有频率也在发生变化,而固有频率很难采用实验的方法直接测得,因此本文采用理论与实验相结合的方式研究不同排气压力和活塞行程下的工作频率与固有频率的匹配特性。

3.1 固有频率与活塞行程和排气压力的关系

图3和图4分别为导通时间 t 为3.5 ms、工作频率 f_o 为60 Hz时,不同排气压力和活塞行程下的固有频率计算值。结果表明:固有频率随排气压力的增大而增大,在相同的排气压力下,随活塞行程增大而减小。因为当排气压力增大时,活塞受到的气体力增大,此时气体弹簧对直线压缩机固有频率的影响要远大于机械弹簧和阻尼。当排气压力一定时,直线压缩机固有频率的变化主要受到系统阻尼的影响,随活塞行程的增大而减小。

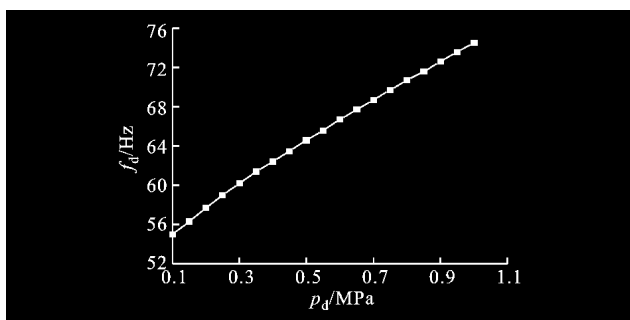


图3 固有频率与排气压力的关系

3.2 工作特性与工作频率的关系

由图5可以看出,活塞行程随着工作频率的增大而减小。由图3可知,在排气压力为0.3和0.35 MPa、工作频率为60 Hz下对应的固有频率分别为60.2和61.4 Hz。当工作频率超过该工况下的固有频率后,其行程变化缓慢,甚至出现小的波动(见图

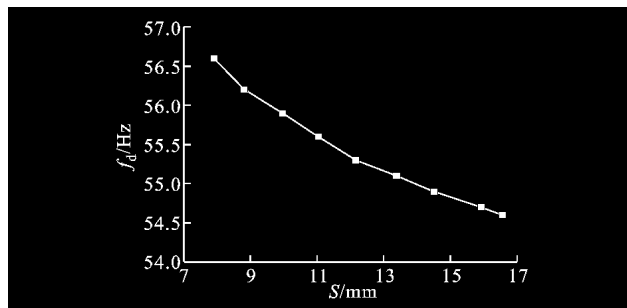


图4 固有频率与活塞行程的关系

5)。因为当排气压力一定时,压缩机固有频率随着活塞行程的减小而缓慢增大,活塞行程随工作频率的增大而减小,因此固有频率是缓慢变大的,其变化率低于工作频率的变化率,使得刚开始时活塞行程减小比较快,当固有频率的变化率接近工作频率时,活塞行程变化变得缓慢,甚至波动。

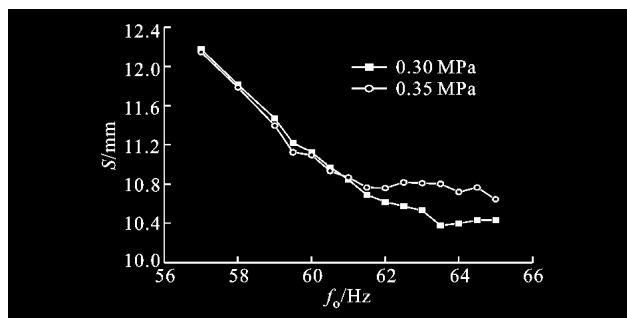


图5 不同工作频率下的活塞行程

由图6、图7可以看出,工作电流和输入功率随着工作频率的增大先减小后增大,然后再减小,最小值时压缩机的工作频率接近该工况下的固有频率。因为当工作频率接近固有频率时,压缩机机械弹簧共振系统处于谐振状态。

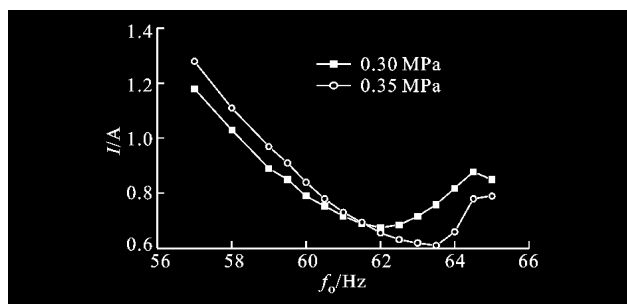


图6 不同工作频率下的线圈电流

由图8可以看出:效率随着工作频率的增大而波动,连续出现效率峰值;当工作频率接近固有频率时,其效率比较高,而且工作可靠稳定;当工作频率接近第3个波谷时,压缩机的噪声很大,而且很不稳定,易发生撞缸现象。

图9为直线压缩机在不同的排气压力和工作频

率下工作电流与活塞速度的相位差的实验结果,可以发现相位差随着工作频率的增大而减小.当工作频率小于 60 Hz 时,相位差随着排气压力的增大而减小,当工作频率大于 60 Hz 时,相位差随着排气压力的增大而增大.

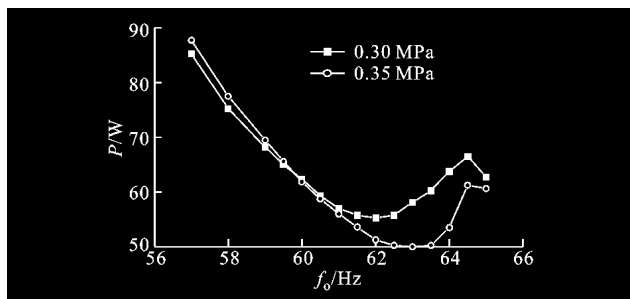


图7 不同工作频率下的输入功率

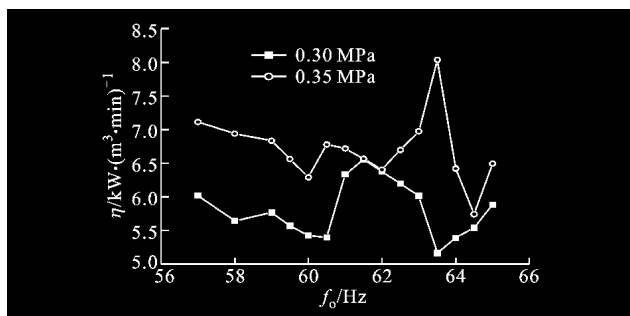


图8 不同工作频率下的效率

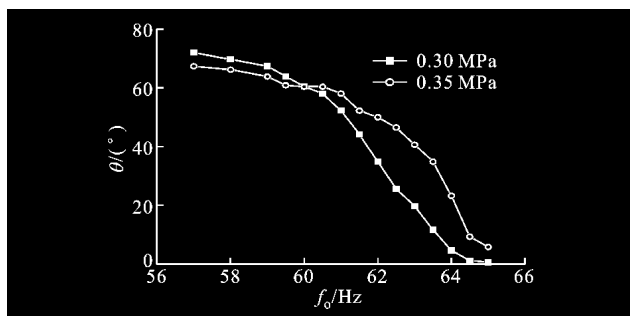


图9 不同工作频率下的相位

3.3 工作频率与固有频率的匹配

由于直线冰箱压缩机在工作过程中,其活塞行程和排气压力是变化的,因此其固有频率也在改变.为了使冰箱压缩机能高效、可靠地稳定运行,在压缩机设计时必须考虑工作频率与固有频率的匹配,可以借鉴以空气为压缩工质的直线冰箱压缩机的频率特性实验结果.对于变导通时间的控制方式而言,当直线冰箱压缩机在额定工况下运行时,其机械弹簧刚度系数应满足

$$K_s = 4\pi^2 f_o^2 + c^2/4m^2 - K_g \quad (8)$$

式中: f_o 为压缩机的工作频率.

4 结 论

(1)直线冰箱压缩机的固有频率随排气压力的增大而增大,当排气压力一定时,固有频率随活塞行程的增大而减小.

(2)直线冰箱压缩机在不同的排气压力下,活塞行程和相位差随工作频率的增大而减小,工作电流和输入功率存在最小值,此时的工作频率接近该运行工况下的固有频率.

(3)直线冰箱压缩机的效率随工作频率的增大而波动,连续出现效率峰值,当工作频率接近固有频率时,其效率较高,而且工作可靠稳定.

(4)在设计直线冰箱压缩机时,为了使压缩机高效、可靠地稳定运行,应保证额定运行工况下的固有频率与工作频率相等.

参考文献:

- [1] LEE H K, SONG G. Development of the linear compressor for household refrigeration [C]//15th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA: School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., 2000: 31-38.
- [2] PARK K, HONG E, LEE H. Linear motor for linear compressor [C]//16th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA: School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., 2002: 31-38.
- [3] KOH D Y, HONG Y J, PARK S J, et al. A study on the linear compressor characteristics of the Stirling cryocooler [J]. Cryogenics, 2002, 42(6):427-432.
- [4] UNGER R Z, van der WALT N R. The simulation and design of a high efficiency, lubricant free, linear compressor for a domestic refrigerator [C]//16th International Refrigeration Conference. West Lafayette, USA: School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., 1992: 43-53.
- [5] 张金权, 畅云峰. 直线压缩机的频率特性研究 [J]. 流体机械, 2006, 34(10):17-19.
ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng. Study on characteristic frequency of linear compressor [J]. Fluid Machinery, 2006, 34 (10): 17-19.
- [6] 张金权. 动磁式直线压缩机试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.
- [7] 张金权, 畅云峰. 动磁直线电机驱动的压缩机建模与仿真 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7):820-824.
ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng. Modeling and simulation of compressor driven by moving-magnet linear motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7):820-824.

(编辑 王焕雪)