

文章编号:0253 - 4339(2017) 03 - 0050 - 06

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2017. 03. 050

冰箱直线压缩机运行不稳定的实验研究

邹慧明^{1,2} 李灿^{1,2,3} 唐明生^{1,2} 田长青^{1,2}

(1 中国科学院低温工程学重点实验室 理化技术研究所 北京 100190; 2 热力过程节能技术北京市重点实验室
中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文进行了直线压缩机冰箱系统的制冷实验,分析了直线压缩机运行的不稳定特性。结果表明:冰箱制冷过程中直线压缩机定频运行,会出现三种不同的不稳定状态:启动调节不稳定、外部扰动不稳定和电磁阀调节不稳定。启动过程中,供电参数的调节以及吸排气压力的变化引起的不稳定状态,随着电参数保持不变和吸排气压力趋于稳定,启动过程的不稳定现象也逐渐消失。当供电参数和制冷工况保持稳定时,制冷系统的随机扰动也会使直线压缩机产生一定的不稳定振荡,行程最大振幅约 0.3 mm,电流和输入功的最大波动约为平均值的 10%,直线压缩机对外部扰动具有自修复性。电磁阀调节过程对直线压缩机的稳定性影响较大,行程最大振幅约 2.2 mm,压缩机存在极大的撞缸可能性。因此非常有必要结合制冷系统的运行工况,进行直线压缩机本体结构和控制系统的优化设计,保证直线压缩机在冰箱调节过程中安全可靠的运行。

关键词 直线压缩机;控制;稳定性;启动特性

中图分类号:TH457; TM925.21

文献标识码: A

Experimental Investigation on Instability of Linear Compressor in Refrigerator

Zou Huiming^{1,2} Li Can^{1,2,3} Tang Mingsheng^{1,2} Tian Changqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China; 2. Beijing Key Laboratory of Thermal Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract The instability of a linear compressor is studied by an experiment on a developed linear compressor in a refrigerator. The experimental results show that there are three types of unstable phenomena: the start-up process, external disturbance process, and solenoid valve adjustment process. During the start-up process, an unstable status is caused by the adjustment of the supply power and changes in the refrigerant suction/discharge pressure. This finally settles down as the supply power and suction/discharge pressure are unchanged. Some external disturbance of the refrigeration system causes an unstable oscillation with a fluctuation of about 0.3 mm of the piston displacement. Accordingly, the current and the input power fluctuate at about 10% of their average values. This oscillation gradually becomes stable as there is no more disturbances. The solenoid valve adjustment process has a great influence on the stability of a linear compressor. In this experiment, the maximal fluctuation amplitude of the displacement is about 2.2 mm, and the piston is apt to strike the cylinder. Therefore, the design optimization for a linear compressor structure, and a control strategy based on the change characteristics of the working conditions, is necessary to ensure operational reliability and high efficiency.

Keywords linear compressor; control; stability; start-up feature

直线压缩机以直线振荡电机直接驱动活塞往复运动做功,省去了曲柄连杆机构,结构更加紧凑,而且具有更大的节能潜力,在低温制冷机、空压机、真空泵、冷藏箱、电冰箱等制冷装置中得到了越来越广泛的应用^[1-5]。在电冰箱中,直线压缩机已经取得较好的应用成果,早在 21 世纪初,韩国 LG 电子已经在自己的大容量冰箱上采用了直线压缩机,近年恩布拉科

也推出了冰箱用直线压缩机产品。随着电冰箱的发展趋势重点指向大容量和多温区时,容量调节和温区控制成为实现冰箱节能与高品质需求的重要的智能控制内容^[6]。

研究表明,直线压缩机独特的自由活塞结构使其运行性能响应非常敏感,不仅具有可通过调节行程实现变容量输出的特点^[7-9],还具有易于出现行程跳跃

基金项目:国家自然科学基金(51576203、51505466)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51576203 & No. 51505466).)

收稿日期:2016 年 9 月 13 日

或振荡不稳定现象的独特特性^[10-13]。在进行冰箱容量调节或温区控制时,供电条件或热力系统工况的变化都会影响直线压缩机的运行响应^[14-15],进而反向影响热力系统的运行特性。供电条件、热力系统工况与直线压缩机性能响应之间互相耦合,互相影响,使直线压缩机在冰箱系统运行时很容易出现不稳定状况。运行不稳定不仅影响系统运行性能,还极易导致压缩机活塞与机身撞击造成损坏而危害系统安全。

为保证直线压缩机在冰箱中高效可靠的运行,本文对直线压缩机冰箱系统进行实验研究,分析冰箱直线压缩机运行的不稳定现象的特点,为冰箱直线压缩机控制技术的研究提供依据。

1 实验装置

1.1 直线压缩机冰箱制冷系统

实验系统采用对开门双温区冰箱,冷冻室容积 239 L,冷藏室容积 403 L,分别设有两个蒸发器与毛细管,结合电磁换向阀,形成两个循环系统,通过控制器对电磁阀进行控制,以实现对各温室独立的温度调节,冰箱制冷系统原理如图 1 所示。当冷藏室温度高于设定值时,冷藏室温控器断开,电磁阀失电,处于默认状态,接通冷藏室毛细管,制冷剂走向如图 1 中空箭头所示:压缩机→冷凝器→干燥过滤器→电磁阀→冷藏室毛细管→冷藏室蒸发器→冷冻室蒸发器,被压缩机吸回,即为一个单系统循环,冷藏室、冷冻室同时制冷。当冷藏室温度达到设定值时,冷藏室温控器闭合,对电磁阀供电,电磁阀得电,吸动阀芯,切断冷藏室毛细管的通路,转而接通冷冻室毛细管,制冷剂走向如图 1 箭头所示:压缩机→冷凝器→干燥过滤器→电磁阀→冷冻室毛细管→冷冻室蒸发器,被压缩机吸回,即为另一个单系统循环,冷冻室单独制冷。

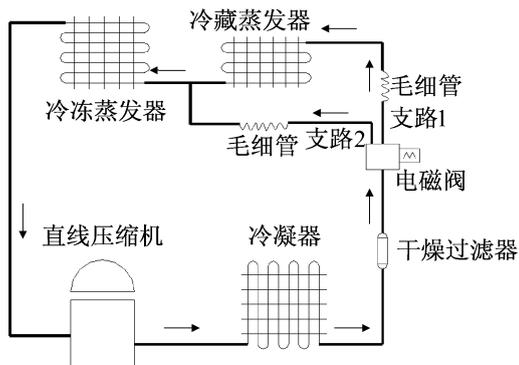


图 1 直线压缩机冰箱制冷系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of refrigeration system

1.2 基于 LabView 的控制平台

为便于控制程序的写入与修改,搭建了基于 LabView 的控制平台,控制系统如图 2 所示。直线压缩机由研制的 PWM 控制板对 220 V/50 Hz 的电源转换,实现直线压缩机供电的变频与调压。在供电电路上设置智能电量计,读取直线压缩机运行的实时电气参数,并通过 R232 通讯接口将测试数据传递给 LabView 平台,在 LabView 平台中进行直线压缩机的运行状态(行程,上死点、频率特性等参数)检测、判断以及调节输出等控制算法的编写,将供电输出参数的控制信号通过 R232 通讯接口传输给 PWM 控制板,实现直线压缩机的运行控制^[16]。实验用直线压缩机的主要参数如表 1 所示。

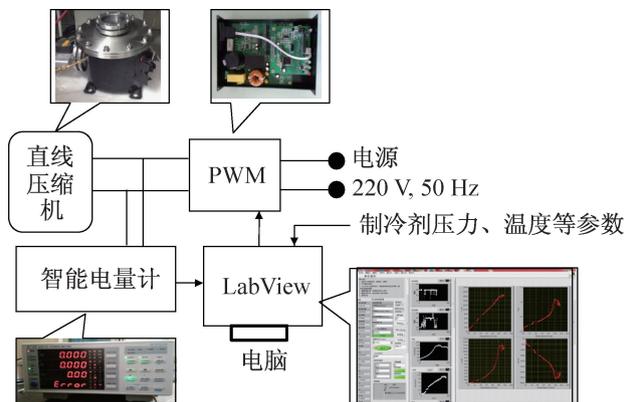


图 2 直线压缩机控制系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

表 1 直线压缩机主要参数

Tab. 1 Main parameters of linear compressor

参数	数值
运动部件质量 m_1/kg	0.825
固定部件质量 m_2/kg	6.2
气缸直径 D/mm	36.0
电磁力系数 $K_0/(\text{N/A})$	75.5
当量电阻 R_e/Ω	6.86
当量电感 L_e/H	0.337

2 实验结果及分析

2.1 运行全程

实验采用固定频率的方式进行直线压缩机运行调节,设定供电频率为 60 Hz,调节供电电压,环境温度为 25 °C,全程运行 150 min。电压的调节过程如图 3(a)所示,启动初始,缓缓地增加供电电压,逐步提高压缩机的运行行程,并在上死点附近通过电压调节

控制上死点,然后电压保持在 116.8 V 不变,进行直线压缩机冰箱稳定性实验。图 3(b)~(f)为运行全程主要测试参数的变化曲线,可知在 150 min 的冰箱制冷全程中,直线压缩机运行响应的稳定性有较大波动,可概括为:1)启动调节不稳定过程(0~27 min);2)外部扰动不稳定过程(28~60 min);3)稳定运行

过程(61~85 min);4)电磁阀调节不稳定过程(86~150 min)。由图 3(f)电机效率曲线可知,启动调节过程电机效率波动较大,效率较低;外扰不稳定过程和温度运行过程电机效率较高;电磁阀调节过程电机效率明显下降。下面将针对其中的不稳定过程(1)、(2)、(4)进行具体分析。

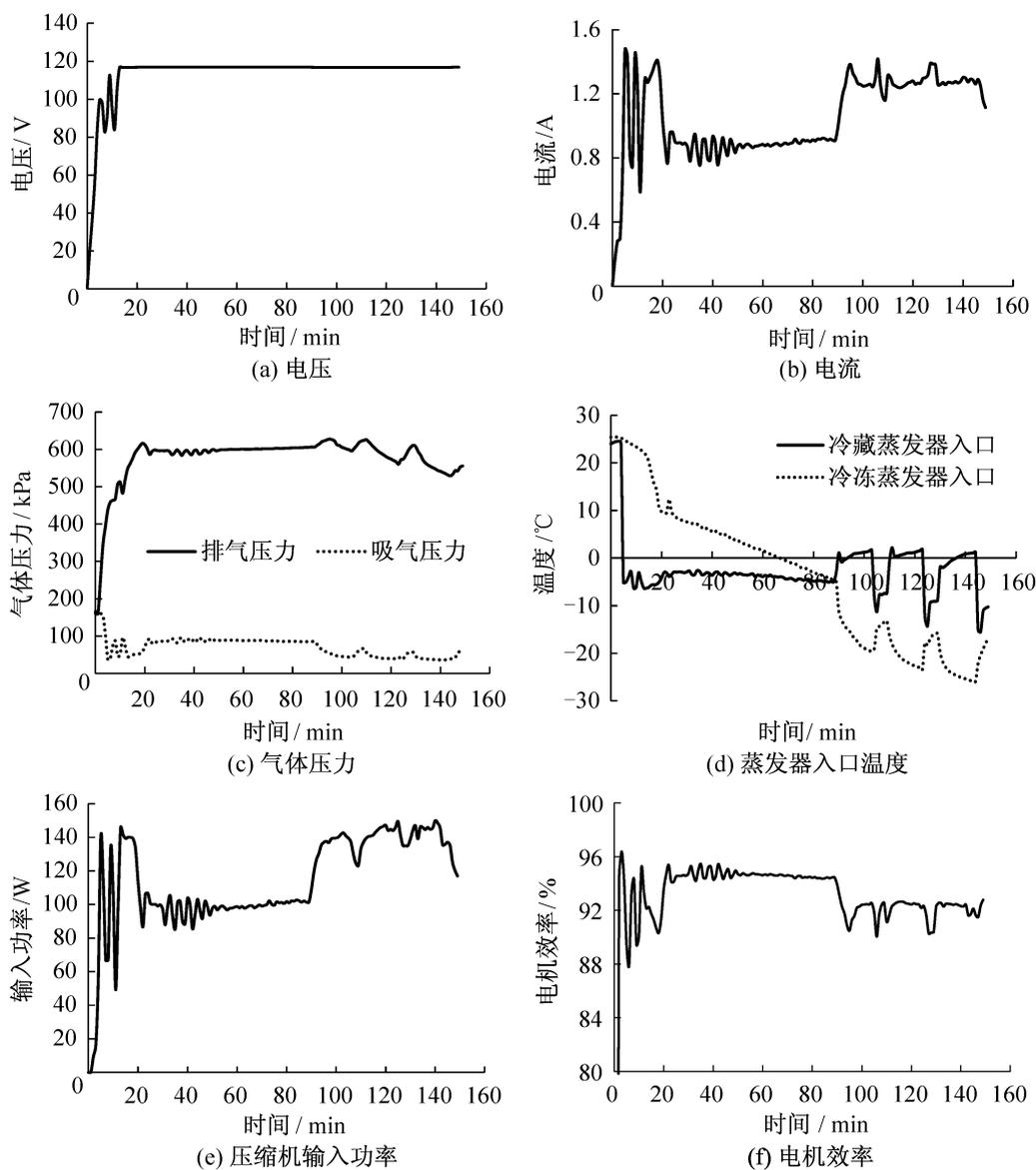


图 3 运行全程

Fig. 3 Whole operating process

2.2 启动调节过程

图 4(a)~(d)所示为启动条件过程中的压缩机运行性能曲线。启动初始,活塞行程随着电压的增加而增大(图 4(a)),同时直线压缩机两侧制冷剂的气体排气压力不断增加,吸气压力不断降低(图 4(b));当行程逐步接近 11.5 mm 附近时出现了行程跳跃,活塞行程突然增大到 16 mm,超过了上死点,控制系统通过下调电压及时减小了活塞行程,由于行

程响应的滞后性,电压降低后行程又小于上死点,因而又经过后面的两次反复调节,直到运行 13 min 电压固定在 116.8 V,期间气体压力、输入功率、电流、冷藏蒸发器入口温度均随着电压调节的波动而波动,其中功率、电流波动达到平均值的 50% 左右。当电压保持 116.8 V 不变时,吸气压力基本不变,排气压力继续增加,使得行程继续下降。当运行 18 min 时,行程降到 13.27 mm,压缩机泵气量减少使

得吸气压力升高, 电流和输入功率下降, 行程进一步下降使得排气压力在 20 min 也开始下降。22 min 时, 吸气压力升高到 92 kPa, 排气压力降到 582 kPa, 吸排气压差的降低使得活塞行程开始回升, 继而吸排气压差继续上升, 活塞行程又缓慢减小并逐

步稳定在 11.97 mm, 启动调节过程结束。综上所述: 启动过程中的不稳定主要由供电参数的调节以及吸排气压力的变化引起, 当供电参数保持不变, 吸排气压力趋于稳定时, 启动过程的不稳定现象也逐渐消失。

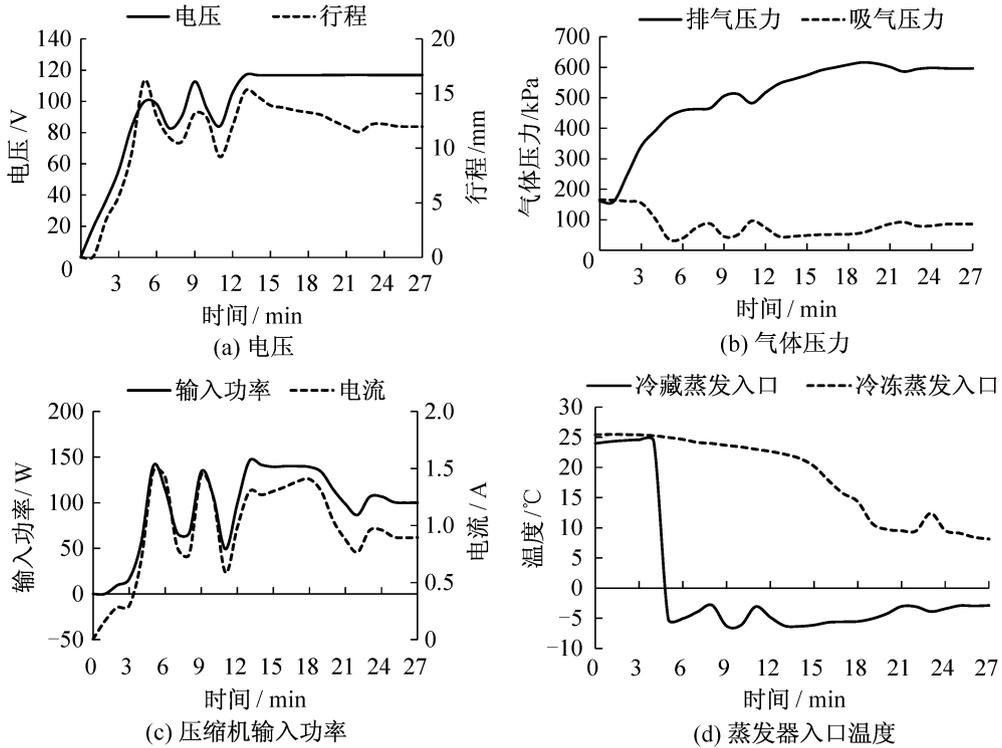


图 4 启动调节过程

Fig. 4 Start adjusting process

2.3 外扰不稳定过程

图 5(a) ~ (d) 所示为运行过程中因外扰产生的不稳定波动过程, 此间供电参数保持不变。活塞行程出现如图 5(a) 所示的振荡波动, 最大振幅约 0.3 mm, 波动周期约 4 min, 波动逐渐减小并趋于稳定, 该过程约 33 min。可知波动过程中吸排气压力、输入功、电流、蒸发器入口温度等均产生响应的波动, 其中吸气压力最大波动约为平均值的 8.1%, 排气压力最大波动约为平均值的 0.86%, 电流和输入功的最大波动约为平均值的 10%。由于制冷系统内部的随机扰动使其行程响应产生了一定的振荡, 且供电参数保持稳定, 系统又逐步从不稳定波动恢复到稳定状态, 体现了直线压缩机对外部扰动的敏感性和自修复性。

2.4 电磁阀调节过程

图 6(a) ~ (d) 所示为电磁阀调节过程系统响应参数变化。88 min 时冷藏室温度达到设定温度时, 电磁阀切断冷藏室毛细管的支路 1 而改为支路 2。支路的变化使得活塞行程逐步增大, 电流和输入功率逐

步增加, 冷藏蒸发器入口温度增加而冷冻蒸发器入口温度逐步下降, 进而吸气压力下降, 排气压力增加, 但随着压缩机吸气密度的下降, 排气压力增加到一定值后开始逐步下降。直到 103 min, 冷藏室温度高于设定温度时, 电磁阀切断支路 2 而改为支路 1, 冷藏蒸发器入口温度迅速降低, 冷冻蒸发器入口温度迅速上升, 活塞行程迅速下降, 制冷剂吸气压力由于行程下降而上升, 排气压力因支路阻力增加而上升。到 110 min 时, 冷藏室的温度再次达到设定温度, 系统又从支路 1 改为支路 2, 完成一个调节周期。从 111 min 到 130 min 为第二个调节周期, 从 131 min 到 150 min 为第三个调节周期, 每个周期约 20 min。电磁阀调节过程中行程最大振幅约 2.2 mm, 输入功上下波动约 26 W, 电流上下波动约 0.28 A。

实验结果表明, 由于电磁阀调节过程对直线压缩机的稳定性影响较大, 当切换到冷冻独立支路时, 直线压缩机的输入、输出参数相比于从冷藏/冷冻串联支路工况运行时有很大的增加, 同时两个支路的相互切换也会引起直线压缩机运行的不稳定波动, 因此,

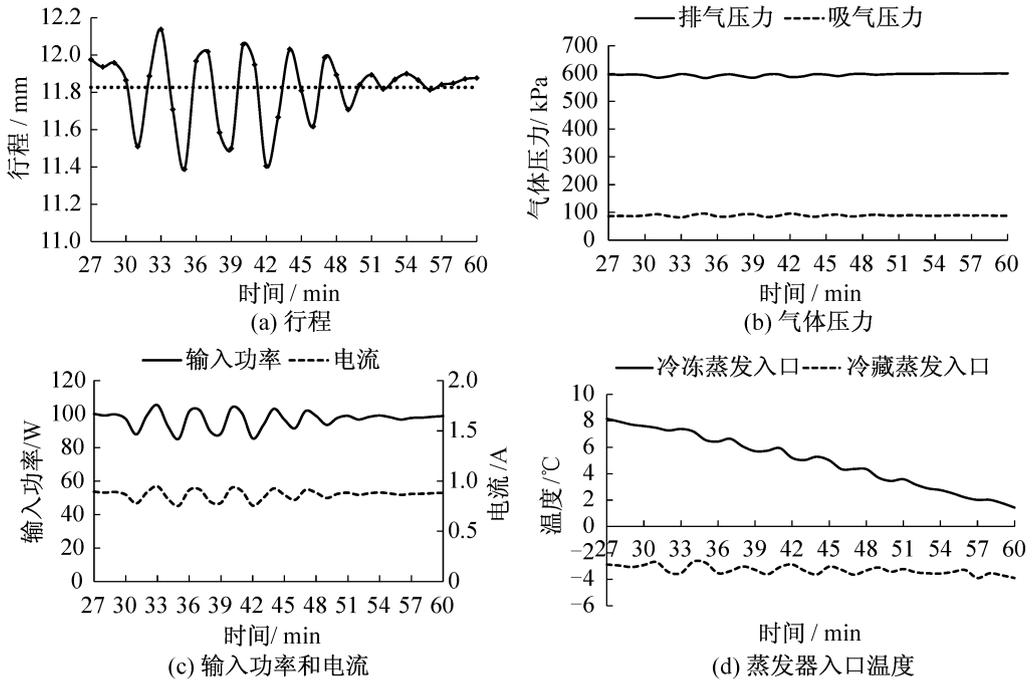


图 5 外扰不稳定过程

Fig. 5 Unstable process with external disturbance

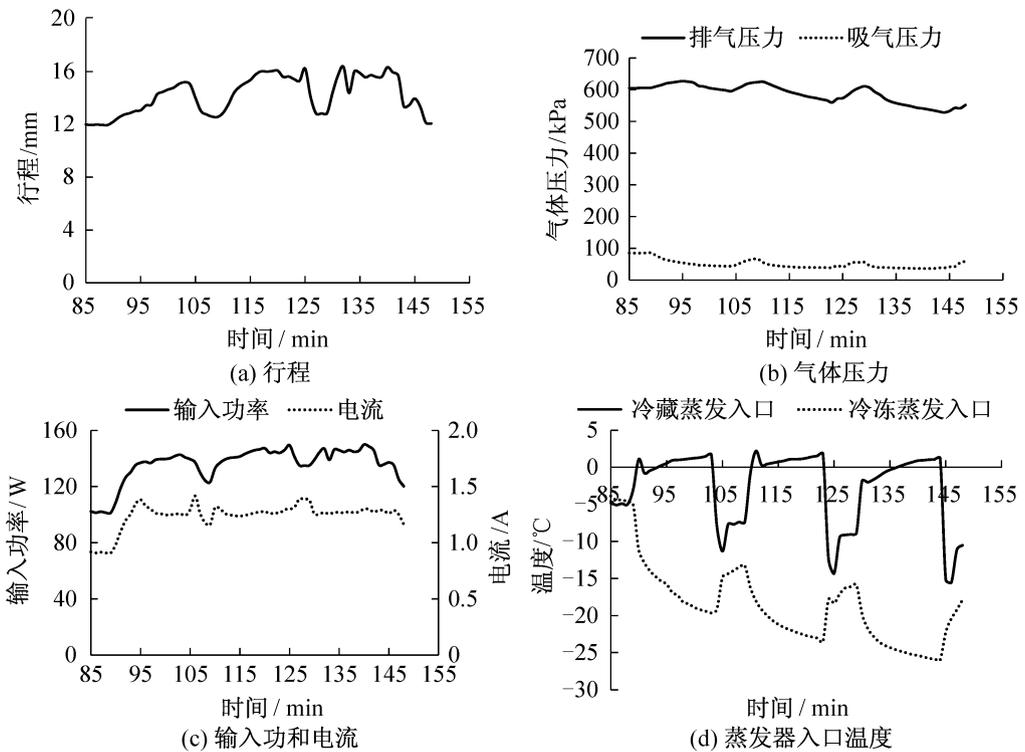


图 6 电磁阀调节过程

Fig. 6 Solenoid valve adjusting process

为保证直线压缩机在冰箱调节过程中安全稳定可靠的运行,需要在直线压缩机的参数设计,运行控制两方面进行综合考虑,防止其因系统支路调节出现行程过大而影响使用安全。

3 结论

本文实验研究了直线压缩机冰箱系统运行过程,分析了直线压缩机运行过程中不稳定现象的特点,得

到如下结论:

1) 冰箱制冷过程中直线压缩机的运行会出现一些不稳定现象,主要包括:启动调节不稳定过程、外部扰动不稳定过程和电磁阀调节不稳定过程三种。

2) 启动过程中,需要通过供电参数的调节进行压缩机的启动,该过程引起的不稳定启动过程中的不稳定主要由供电参数的调节以及吸排气压力的变化引起,当供电参数保持不变,吸排气压力趋于稳定时,启动过程的不稳定现象也逐渐消失。

3) 当供电参数保持不变,制冷系统内部的随机扰动也会使直线压缩机产生一定的不稳定振荡,当供电参数和制冷工况保持稳定时,系统又逐步从不稳定波动恢复到稳定状态,直线压缩机对外部扰动具有敏感性和自修复性。

4) 电磁阀调节过程对直线压缩机的稳定性影响较大,结合制冷系统的运行工况进行直线压缩机本体结构和控制系统的优化设计,是直线压缩机在冰箱调节过程中安全稳定可靠运行的必要保证。

参考文献

[1] Unger R. Development and testing of a linear compressor sized for the European market [C]//Proceedings of International Appliance Technology Conference at Purdue. Purdue: Purdue University, 1999: 41-49.

[2] Lee H K, Song G Y, Park J S, et al. Development of the linear compressor for household refrigeration [C]//Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue, Purdue: Purdue University, 2000: 31-38.

[3] 张立钦,邹慧明,徐洪波,等.小型制冷装置用线性压缩机的研究与应用[J].压缩机技术,2008(5):1-6. (ZHANG Liqin, ZOU Huiming, XU Hongbo, et al. State of art of linear compressor for small refrigeration equipment [J]. Compressor Technology, 2008(5): 1-6.)

[4] Cao Y G, Chen X, Wu Y N. Theoretical and experimental investigation of two pulse tube cryocoolers driven by a single opposed linear compressor [J]. Cryogenics, 2014, 61: 154-157.

[5] Liang K, Richard S, Mike D, et al. A novel linear electromagnetic-drive oil-free refrigeration compressor using R134a [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 450-459.

[6] 王维,王瑞,秦宗民.采用变频压缩机的风冷冰箱系统性能研究[J].制冷学报,2013,34(6):90-95. (WANG Wei, WANG Rui, QIN Zongmin. An experimental analysis of a frost-free refrigerator using a variable capacity compressor [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(6): 90-95.)

[7] Yoo J Y, Park S, Lee H, et al. New capacity modulation algorithm for linear compressor [C]//International Compressor Engineering Conference at Purdue, Purdue: Purdue University, 2010.

[8] Bradshaw C R, Groll E A, Garimella S V. Linear compressors for electronics cooling: Energy recovery and its benefits [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(7): 1-7.

[9] Kim K J, Jeong H J. Dynamic response of a capacity-modulated linear compressor to supply voltage disturbances [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 84-96.

[10] Choe G S, Kim K J. Analysis of nonlinear dynamics in a linear compressor [J]. International Journal Series C of Japan Society of Mechanical Engineers, 2000, 43(3): 545-552.

[11] Choe G S, Kim K J. Theoretical and experimental analysis of nonlinear dynamics in a linear compressor [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 124(1): 152-154.

[12] Zou H M, Zhang L Q, Peng G H, et al. Experimental investigation and performance analysis of a dual-cylinder opposed linear compressor [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(8): 1885-1892.

[13] Zou H M, Tang M S, Xu H B, et al. Performance characteristics around the TDC of linear compressor based on whole-process simulation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(10): 4163-4171.

[14] Kim K J, Kim J B. Modulation characteristics of a linear compressor for evaporating and condensing temperature variations for household refrigerators [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 370-379.

[15] Kim H, Roh C, Kim J, et al. An experimental and numerical study on dynamic characteristic of linear compressor in refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2009 (32): 1536-1542.

[16] Tang M S, Zou H M, Xu H B, et al. Stroke and natural frequency estimation for linear compressor using phasor algorithm [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 46(4): 763-774.

通信作者简介

邹慧明,女,博士,副研究员,中国科学院理化技术研究所,(010)82543697,E-mail: zouhuiming@mail.ipc.ac.cn。研究方向:压缩机及制冷与人工环境新技术。

About the corresponding author

Zou Huiming, female, Ph. D., associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, +86 10-82543697, E-mail: zouhuiming@mail.ipc.ac.cn. Research fields: compressor technology, refrigeration and artificial environment.