

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260630001

姿态跟随型热泵用对置直线压缩机串并联供电驱动特性研究

张 硕^{1,2,3} 任志杰¹ 邵闻聪¹ 吴桂芳¹ 唐明生¹ 邹慧明^{1,2}

(1 低温科学与技术全国重点实验室 中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学前沿交叉科学学院 北京 100049; 3 北京建筑大学环境与能源学院 北京 102616)

摘 要 直线压缩机去除了曲柄连杆传动结构,易于实现无油运行。工质自润滑对置直线压缩机可以用于姿态跟随型热泵中,并显著提升系统流量。本文研制了双电机型对置式工质自润滑直线压缩机样机,并搭建了压缩机测试实验台架,使用R1234yf制冷剂对压缩机进行了变容量调节实验,进一步分析了串并联供电驱动模式下压缩机的动态响应。结果表明:并联驱动模式相较于串联模式压缩机运行电压更小,使对置压缩机内部2台压缩机到达相同行程所需电压差更小。在62 Hz的运行频率下,供电电压从120 V增至160 V,串联模式的功率因数比并联模式平均高0.17,平均电机效率提高8.1%。在不同应用场景下应选择合适的压缩机驱动模式。

关键词 直线压缩机;对置运行;无油润滑;供电方式;动态特性

中图分类号: TB652;TH45

文献标识码: A

Experimental Investigation of Series and Parallel Drive Characteristics in an Opposed-Piston Linear Compressor for Attitude-Following Heat Pumps

Zhang Shuo^{1,2,3} Ren Zhijie¹ Shao Wencong¹ Wu Guifang¹ Tang Mingsheng¹ Zou Huiming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Advanced Interdisciplinary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environment and Energy, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

Abstract Linear compressors eliminate the slider-crank mechanism and facilitate oil-free operations. Self-lubricating opposed-piston linear compressors are suitable for integration into attitude-following heat-pump systems while significantly enhancing the system flow rate. In this study, a dual-motor self-lubricating opposed-piston linear compressor prototype was developed, and a comprehensive test bench was established. Using the R1234yf refrigerant, variable-capacity experiments were conducted to analyze the dynamic responses under series and parallel power supply modes. The results indicate that parallel drive requires a lower voltage than series mode, reducing the voltage differential required to achieve synchronized piston strokes in opposing configurations. During 62 Hz operation, when the supply voltage increased from 120 to 160 V, the series mode maintained, on average, a 0.17 higher power factor and 8.1% greater motor efficiency compared with the parallel mode. Thus, the driving mode selection should consider the specific application requirements.

Keywords linear compressor; opposed-piston operation; oil-free lubrication; power supply configuration; dynamic characteristics

基于蒸气压缩式循环的制冷、供热系统已在家用冰箱、热泵、军工、航天等领域得到了广泛应用,但在雷达、机载等需要做俯仰和翻转运动的设备中仍因压缩机回油困难而受到限制^[1]。姿态跟随型系统

特指配套于机载、车载等运动平台,能够伴随装备进行俯仰、横滚、翻转等多自由度姿态调整,且全过程保持制冷/供热性能与运行稳定性的热管理系统^[2-4]。因此,在姿态跟随型热泵中需要使用无油压缩机来

收稿日期:2026-06-30;修回日期:2026-07-14;录用日期:2026-07-14

责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金项目(52276023)资助。(The project was supported by the National Science Foundation of China (No. 52276023).)



移动阅读

避免回油组件带来的不利影响。直线压缩机作为往复压缩机的一种,取消了传统的曲柄连杆结构,采用直线电机和谐振结构驱动,具有结构紧凑、机械传动效率高、易于实现无油运行的特点^[5-7],是无油系统极具潜力的解决方案。

直线压缩机无油运行的关键在于减小活塞和气缸之间的摩擦损失,可通过采用大刚度谐振弹簧提供径向支撑或利用气体轴承实现工质自润滑等方式实现。Li Chengzhan 等^[8]开发了使用大刚度弹簧支撑的对置无油直线压缩机,结果表明,对置无油直线压缩机的设计可有效抑制活塞偏移,单活塞压缩机活塞偏移量为满行程的 20%,而对置无油直线压缩机的活塞偏移量仅为最大行程的 2.1%。工作温度为 $-3.9\sim 51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其相对卡诺效率大于 47.5%。Zhang Shuo 等^[9]提出了一种喷射补气式工质自润滑直线压缩机,将准二级压缩系统中的中压制冷剂引入直线压缩机的气体轴承,相较于排气自润滑的气体轴承供气方式,该中压供气方式可有效减小压缩机排气损失,相较于传统无油压缩机可提升系统流量 28%。

对置式直线压缩机可在有效抑制活塞偏移量的同时减小机身振动,进而提升压缩机的运行稳定性。采用单级压缩的对置式设计也可以提升直线压缩机的排量,进而提升系统的质量流量。Wei Yidi 等^[10]设计了一种由 2 个活塞气缸组件和 1 个直线电动机组成的新型双活塞直线压缩机,并构建了包含热力学子模型、动力学子模型、三相直线电机子模块和控制系统的数值模型。结果表明,对置直线压缩机的输出特性主要取决于活塞的工作频率和行程,当系统在频率为 12 Hz 行程为 26 mm 下工作时,整机效率可达 57.59%。在此基础上,Kong Fanchen 等^[11]研发了一种单电机驱动的新型对置直线压缩机,2 台直线压缩机的气缸和活塞通过连接杆连接,由电机同时驱动。当压力比设置为 2.5 时,等效气体刚度和上止点处的等效阻尼系数比单级分别降低了 25.7% 和 11.6%。

欧盟含氟气体法规 2014 年启动,旨在逐步淘汰全球变暖潜值(GWP, Global Warming Potential)为 150 或以上的制冷剂^[12]。随着《基加利修正案》的提出,制冷剂的替代已迫在眉睫^[13]。R134a 是最常见的商业用制冷剂之一,其 GWP 为 1 430,在 2022 年后需要逐步被替代。R1234yf 是一种人工合成制冷剂,GWP 为 4,具有和 R134a 相近的热物理性质,被认为是一种理想的环保替代制冷剂^[14]。Li Zhaohua 等^[15]搭建了数值模型用于分析 R1234yf 直线压缩机的动态特性,结果表明,对于压力比为 2.5、冲程为 12 mm、冷凝器

温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的直线压缩机,使用 R1234yf 制冷剂的直线压缩机可以实现 86% 的电机效率、120 W 的冷却能力和 3.0 的 COP,同时使用 R1234yf 的直线压缩机的热力学效率比使用 R134a 低 20%~50%。

姿态跟随型热泵对压缩机的稳定性要求较高,对置式工质自润滑直线压缩机是解决回油困难、实现热泵姿态无关运行的关键部件,供电方式会影响对置直线压缩机的运动同步性,进而影响姿态跟随型热泵的可靠性。已有学者对脉管制冷机压缩机的串并联驱动方式进行了研究^[16],但对于姿态跟随型热泵用对置直线压缩机的驱动方式研究较少。本文设计并搭建了工质自润滑直线压缩机测试台架,采用 R1234yf 测试了对置直线压缩机的串并联驱动特性。通过调节压缩机工频及活塞行程,实验对比分析了串并联驱动方式下对置直线压缩机的动态特性,为对置直线压缩机的推广应用提供了研究基础。

1 实验台架介绍

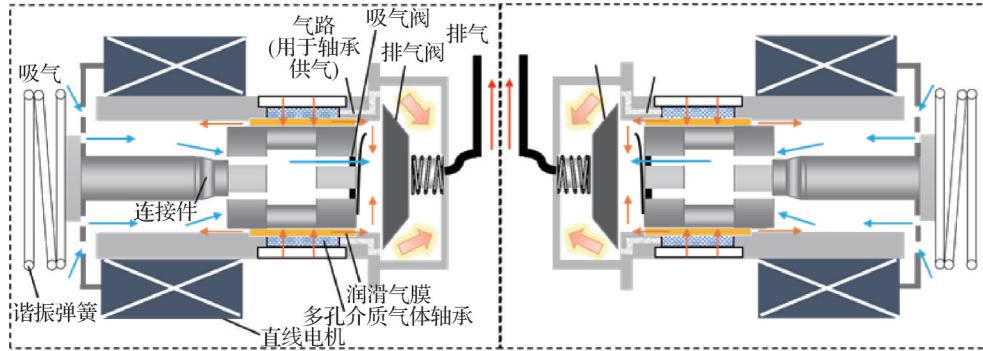
1.1 压缩机结构

本研究开发了工质自润滑式对置直线压缩机样机,其结构如图 1(a)所示。对置式直线压缩机由 2 台相同尺寸、使用多孔介质气体轴承的无油直线压缩机组成,其对置方式为活塞对置,电机置于两侧。从结构上看,工质自润滑式对置直线压缩机采用压缩机并联工作的方式,2 台压缩机均设有单独外壳。2 台压缩机的吸气和排气各自由 2 根耐压管道连接,换言之,理想情况下 2 台压缩机运行时行程一致,活塞运动方向相反,吸气和排气同时进行,理论上,在相同工况下,对置直线压缩机的排气流量是单台直线压缩机的 2 倍。2 台压缩机的电机上各自设有接线端子,可用单台电源实现串联和并联驱动,如图 1(b)和图 1(c)所示。图中的透明视窗用于激光位移传感器测量活塞位移,对置式压缩机的单机电流及电压由自主研发的数据采集及控制程序通过读取总电源数据,根据单机的电气参数计算获得,具体台架将在图 2 中详细描述。

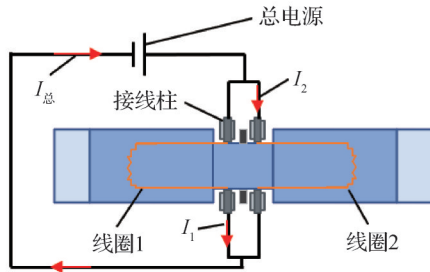
工质自润滑直线压缩机由活塞、气缸、直线电机、定子、转子、多孔介质气体轴承、谐振弹簧、阀组件及其他连接件组成。压缩腔和排气腔之间由排气阀隔绝,排气腔和气体轴承之间设有气路,被压缩的高压制冷剂分成 2 路,一路流向热泵系统作为系统流量,另一路从气路进入气体轴承,为活塞和气缸之间提供润滑。高压制冷剂经多孔介质气体轴承节流降压后,依据活塞和气缸的相对位置进入压缩腔或活塞与气缸之间的间隙。谐振弹簧用于为活塞提供回

复力和径向支撑,活塞与动子通过活动连接组件相连。工质自润滑直线压缩机的工作过程为膨胀、吸气、压缩、排气,因轴承耗气引起的压缩腔内制冷剂

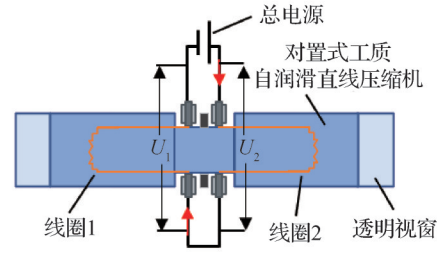
热力学参数的变化将一并考虑在矢量算法模型中,将在本文第2节介绍。



(a) 工质自润滑对置直线压缩机结构示意图



(b) 并联驱动示意图



(c) 串联驱动示意图

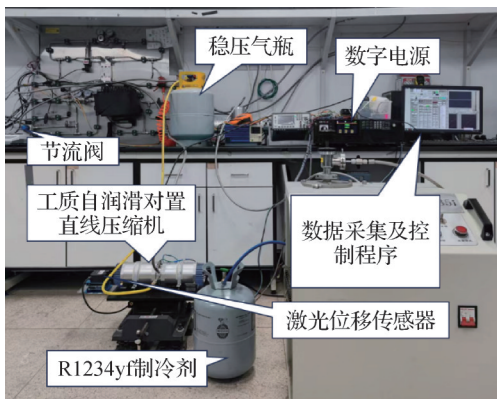
图1 工质自润滑对置直线压缩机结构及供电示意图

Fig.1 Structure and power supply for self-lubricating opposed linear compressor

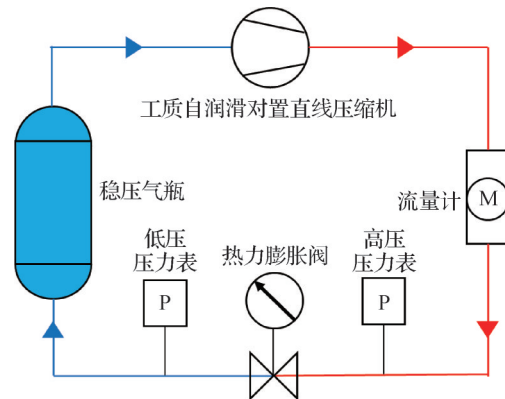
1.2 实验装置

工质自润滑对置直线压缩机的动态特性测试装

置与邱长煦等^[17]测试无油有阀直线压缩机性能的台架原理相同,实验系统流程如图2所示。



(a) 实验台架



(b) 实验系统流程

图2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

实验装置主要由压缩机、质量流量计、压力表、热力膨胀阀、稳压气瓶、激光位移传感器、数字电源、数据采集及控制器组成。首先将系统充注 R1234yf 制冷剂,充注压力为 0.2 MPa,系统的压力差由压缩机和节流阀共同建立,由于仅关注压缩机的串并联驱动特性,不考虑系统性能,因此本研究不对制热性

能进行评估,仅关注压缩机的动态特性及行程变化。流量测试仪表原理为测量标况下的体积流量,将该值与制冷剂在标况下的密度及转换系数相乘即可得到质量流量, R1234yf 的制冷剂物性参数从 REFPROP 9.1 中获得。稳压气瓶用于维持低压侧系统压力稳定,实验过程中固定热力膨胀阀开度,单一

变化压缩机的接线方式、供电频率和电压。调节电压用以控制对置直线压缩机的行程,分别记录相同电压下2台压缩机的行程响应和相同行程下供电电压的变化,频率调节幅度为2 Hz,压缩机冷却形式为水冷。对置直线压缩机放置在减振平台上,其外壳两侧设有透明视窗,用于使用激光位移传感器测量活塞行程。实验过程中通过开发的Labview控制程序对直线压缩机进行在线监测和数据记录,测量仪器的型号及不确定度如表1所示。测量工况如表2所示,由于本研究主要关注姿态跟随型热泵用对置直线压缩机的串并联活塞运动特性,压缩机的吸排气温度变化并非主要关注对象,此处主要列出活塞行程范围、供电频率范围、吸排气压力及压比范围。

表1 测量仪器不确定度

Tab.1 Uncertainty of measuring instruments

测量仪器	型号/测量范围	不确定度
压力传感器	ColliHigh, JYB-KO-HVA, 0~4 MPa	$\pm 0.5\%$
质量流量计	AST10, 0~5 L/min	± 0.0175
数字电源	ITECH, IT7805-350-30 0~350 V, 0~30 A	± 10 mV ± 10 mA
激光位移传感器	KEYENCE, LK-H080, 0~36 mm	± 0.1 μ m

表2 测量工况

Tab.2 Experimental operating conditions

参数	范围
驱动方式	串/并联
活塞行程	6~11 mm
供电频率	60~70 Hz
吸气压力	0.2~0.3 MPa
排气压力	0.4~0.8 MPa
压比	2~4

2 理论分析与参数计算

直线压缩机的电路平衡方程如式(1)所示,电磁力系数 K_0 用于描述活塞运动产生的反电动势。活塞在运动过程中受到惯性力、摩擦力、弹簧力、气体力和电磁力等5个力作用,力学平衡如式(2)所示。本节的理论分析针对单台压缩机建立,通过对比对置式压缩机内部2台压缩机的动态响应特性以获得整机的运行特性。

$$L_e \frac{di}{dt} + R_e i + K_0 v = u \quad (1)$$

$$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{d^2 x}{dt^2} + c_f \frac{dx}{dt} + k_s x + F_g = K_0 i \quad (2)$$

式中: L_e 为等效电感,H; R_e 为等效电阻, Ω ; m_1 为动子质量,kg; m_2 为机架质量,kg; k_s 为弹簧刚度,N/m; c_f 为等效摩擦阻尼系数,N·s/m; K_0 为电磁力系数,N/A; i 为电流,A; v 为活塞速度,m/s; u 为电压,V; t 为时间,s; F_g 为气体力,N。

将直线压缩机的电路平衡方程和力学平衡方程中的各电压分量和力学分量在矢量图中表示,可得到直线压缩机矢量模型,如图3所示。活塞速度和电流的相位差用 α 表示,在直线压缩机运行过程中会出现活塞速度超前和滞后电流2种情况。图3(a)表示活塞速度滞后于电流,图3(b)表示活塞速度超前于电流。式(3)和式(4)用于计算功率因数以及活塞速度与电流的相位差。根据矢量模型,可得到系统等效刚度和系统等效阻尼,由式(5)和式(6)计算。

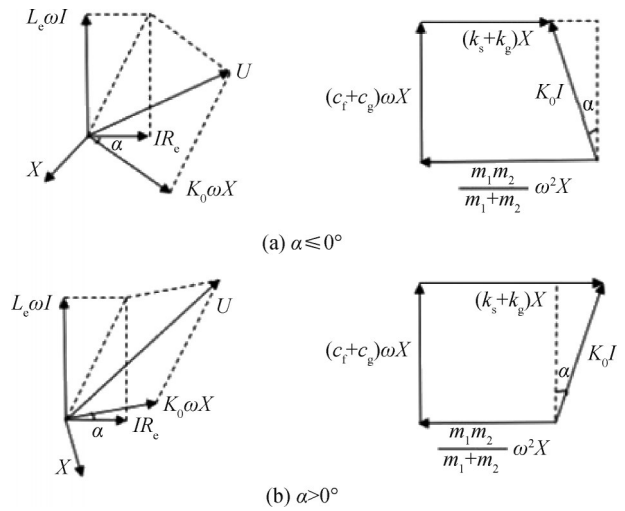


图3 直线压缩机矢量模型

Fig.3 Phasor model of linear compressor

$$\theta = \arccos\left(\frac{P_i}{U_e I_e}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{U \sin \theta - L_e \omega I}{K_0 \omega X}\right) \quad (4)$$

$$k_g + k_s = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \omega^2 + \frac{K_0 I \sin \alpha}{X} \quad (5)$$

$$c_g + c_f = \frac{K_0 I \cos \alpha}{\omega X} \quad (6)$$

式中: θ 为电流与电压的相位差,(°); P_i 为直线电机输入功率,W; U_e 为输入电压有效值,V; I_e 为输入电流有效值,A; U 为供电电压,V; I 为供电电流,A; k_g 为等效气体弹簧刚度,N/m; c_g 为等效气体阻尼系数,N·s/m; X 为活塞行程幅值,mm; ω 为活塞运动角速度,rad/s。

直线压缩机气体力在直线压缩机运行过程中通常处于非线性时变状态,作为衡量气体力动态特性的指标,气体等效弹簧刚度和等效气体阻尼系数通常作为计算变量得到。在直线压缩机装配前,根据

胡克定律实验测量得到弹簧刚度,为12 380 N/m。直线压缩机的等效摩擦阻尼系数通过测量动静部件之间的摩擦损失得到,通常通过电机空载法测量,将排气阀拆卸使直线压缩机空载运行,此时无气体负载,矢量算法得到的系统等效阻尼即为等效摩擦阻尼系数,本研究中等效摩擦阻尼系数为5 N·s/m。在获得弹簧刚度和等效摩擦阻尼系数的基础上,正常安装压缩机并向系统充注制冷剂,即可利用矢量模型通过式(5)和式(6)反算气体参数。直线压缩机的固有频率 f_n 的计算式如式(7)所示。根据矢量模型,可以得到电压、电流和行程的计算式,如式(8)~式(10)所示。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)(k_g + k_s)}{m_1 m_2}} \quad (7)$$

$$U = \sqrt{(IR_e + K_0 \omega X \cos \alpha)^2 + (L_e \omega I + K_0 \omega X \sin \alpha)^2} \quad (8)$$

$$I = \frac{X \sqrt{(k_s + k_g - m\omega^2)^2 + ((c_f + c_g)\omega)^2}}{K_0} \quad (9)$$

$$X = \frac{\sqrt{(U_m \cos \theta - I_m R_e)^2 + (U_m \sin \theta - L_e \omega I_m)^2}}{K_0 \omega} \quad (10)$$

式中: U_m 为激励正弦电压的峰值,V; I_m 为直线压缩机绕组正弦电流的峰值,A。

3 分析与讨论

3.1 活塞行程分析

在11 mm行程下,串并联驱动方式的对置直线压缩机总电压随驱动频率的变化如图4所示。压缩机1和压缩机2分别表示对置直线压缩机中2台压缩机的编号,制造工艺和装配方式存在不可避免的不一致性,使2台压缩机的等效电阻和等效电感产生细微差异,这也导致了在相同驱动频率和目标行程下,2台压缩机的驱动电压存在差异。当驱动频率从60 Hz增至70 Hz,对置直线压缩机串联同时满足压缩机1的行程为11 mm时总驱动电压从285 V降至148 V,降低了48.1%;满足压缩机2的行程为11 mm时总驱动电压从351 V降至159 V,降低了54.7%。当对置直线压缩机并联驱动满足压缩机1的目标行程为11 mm时,总驱动电压从159 V降至78 V,降低了50.9%;满足压缩机2的目标行程时,总驱动电压从163 V降至79 V,降低了51.5%。由式(10)可知,在相同行程下,供电频率增加会引起驱动电压减小,串并联驱动方式对该特性影响较小。

驱动频率变化始终小于固有频率,固有频率在相同行程下随驱动频率的增加变化幅度不显著,当

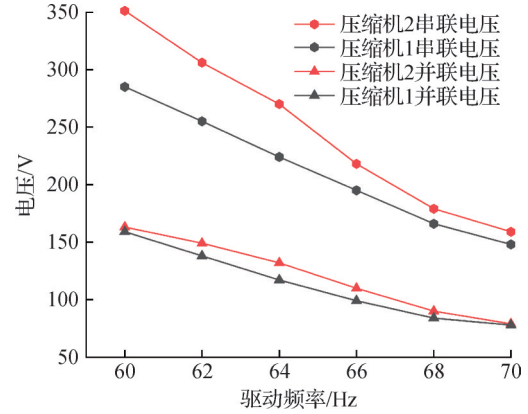


图4 11 mm活塞行程下不同驱动方式对置直线压缩机总电压随驱动频率的变化

Fig.4 Variation of total voltage with driving frequency for opposed linear compressor under different drive modes at 11 mm piston stroke

驱动频率增加逐渐靠近固有频率时,电机效率升高,所需驱动电压降低。

驱动频率保持为66 Hz,调节总电压使直线压缩机1和直线压缩机2的行程各自从7 mm增至11 mm,串并联驱动模式下总电压随行程的变化如图5所示。串联模式下,活塞行程从7 mm升至11 mm时,使压缩机1和压缩机2到达目标行程所需的总电压分别增长了84.7%和74.1%;并联模式下,随着活塞行程的上升,当压缩机1和压缩机2分别到达目标行程时,对置直线压缩机的总电压分别增长了69.2%和76.8%。由此可知,相同行程下,对置直线压缩机采用并联驱动比采用串联驱动到达相同目标行程时所需的电压绝对值更小,意味着在实际运行中对置直线压缩机采用并联驱动对电源规格要求更宽松。

供电频率为66 Hz时采用串并联驱动方式调节总电压,使压缩机2的行程相等,记录此时压缩机1

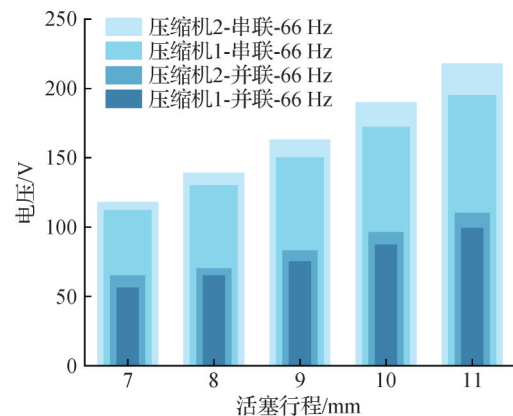


图5 驱动频率为66 Hz时总电压随行程的变化
Fig.5 Variation of total voltage with piston stroke at a driving frequency of 66 Hz

的行程及电参数,结果如图6所示,行程差异百分比是指2台压缩机的行程差与压缩机2行程的比值。当压缩机2的行程从6 mm增至11 mm,排气压力从0.45 MPa增至0.76 MPa,并联模式下总电压从50 V升至111 V,总电流从1.22 A增至2.42 A,压缩机1的行程从6.3 mm增至12 mm;串联模式下总电压从100 V增至218 V,总电流从0.59 A升至1.17 A,压缩机1的行程从6.34 mm增至11.9 mm。并联驱动模式下,对置直线压缩机的平均行程差异百分比为7.1%;串联模式下,该值为7.3%。由此可知,并联模式下,对置压缩机运行至目标行程所需总电压小于串联模式,但所需总电流大于串联模式。由于串联驱动会强制对置直线压缩机内部2台压缩机的电流一致,当出现行程差异时,较小行程压缩机的感应电动势减小,为维持相同电压,回路总电流会增大,进而提升电磁力和对应行程,这被称为串联驱动的自补偿特性。但当2台压缩机电参数差异较小时,串并联模式对行程差异的影响较小。

在对对置直线压缩机进行容量调节时,串并联驱动模式下2台压缩机达到相同目标行程时总供电

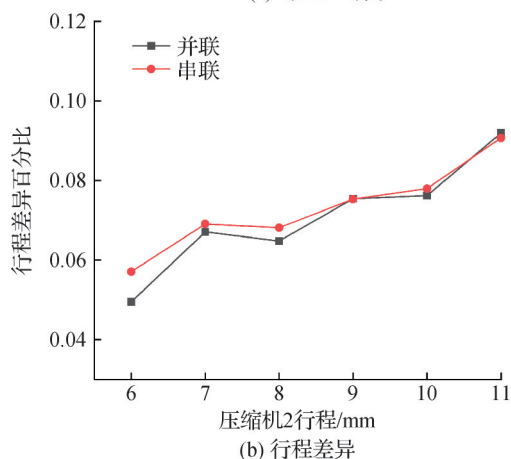
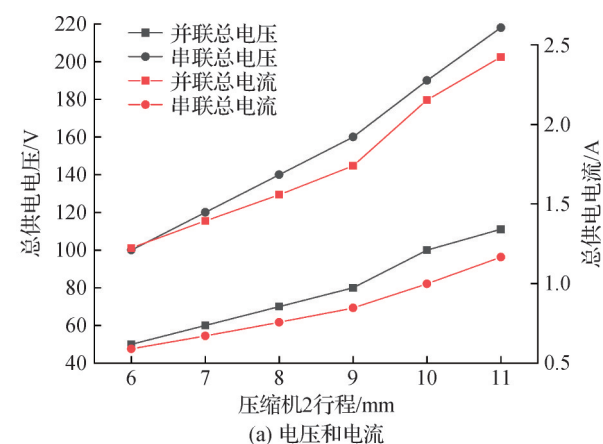


图6 不同驱动模式下的行程响应特性

Fig.6 Response characteristics of piston stroke under different drive modes

电压差值的变化如图7所示。2台压缩机运行在频率为60 Hz、行程为10 mm处出现最大电压偏差,最大供电电压偏差为68 V。同时,在11 mm行程下当驱动频率从60 Hz增至70 Hz时,串联驱动下2台压缩机到达相同行程下的总电压差值为14%,并联下该比值为7.6%,可见并联连接所需的总电压绝对值小于串联连接,且使2台压缩机到达相同行程时的总电压差值更小。由此可知,并联驱动模式下比串联驱动模式下2台压缩机的电压响应更同步,总供电电压差值最大发生在串联低频高行程处,最小出现在并联高频大行程处。在并联模式下,总电压差值随驱动频率的增加呈先增后减的趋势,该现象可通过电路平衡方程(式(1))来解释。当压缩机在低频段(如60~64 Hz)运行时,随着频率的升高活塞速度增加,反电动势也随之增大,同时感抗也随频率的升高而显著增大,导致电感压降也快速增大,由于2台压缩机的电感、电磁力系数存在差异,这种频率升高导致反电动势和电感压降增大的效应会放大2台压缩机的电压需求差异,进而导致总电压差随频率升高而增大。当直线压缩机工作频率超过64 Hz时,电机的磁滞和涡流损耗随频率升高而急剧增大,等效电阻也迅速增加,部分抵消了2台压缩机由电感和反电动势引起的差异。同时频率升高导致气体力增加,相对削弱了2台压缩机电机参数的不一致性,使2台压缩机的运动同步性提升,抑制了达到相同行程的电压需求。在串联驱动模式下,总电压差值随频率升高而单调递减。这是由于串联模式强制2台直线压缩机的供电电流相同,单台压缩机的总阻抗随频率升高而增大,不同于并联驱动下2台压缩机各自分流,串联驱动下阻抗对电压的影响占比最大,进而削弱了反电

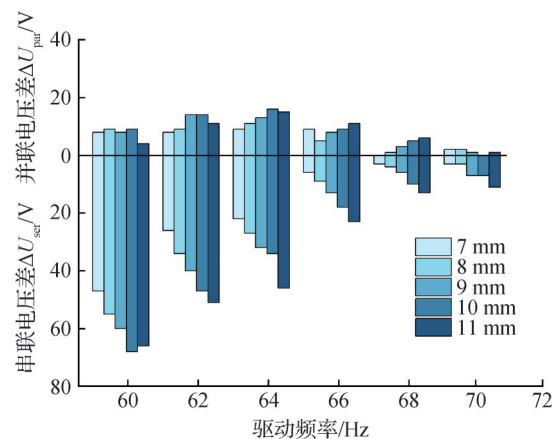


图7 对置直线压缩机内部驱动电压差随行程和频率的变化

Fig.7 Variation of internal driving voltage difference with piston stroke and driving frequency for opposed linear compressor

动势和电机损耗对总驱动电压的影响。

3.2 电机响应分析

在 62 Hz 的供电频率下,不同驱动模式时对置直线压缩机的电路总功率因数和平均电机效率随电压的变化如图 8 所示。当供电电压从 120 V 增至 160 V,并联驱动模式下电路总功率因数降低了 9.9%,平均电机效率降低了 4%;串联驱动模式下功率因数下降了 9.8%,平均电机效率降低了 1%。注意到串联驱动模式下功率因数和电机效率均高于并联模式,这是由于在串联回路中,双电机对置直线压缩机内部 2 台压缩机的活塞运动方向相反,导致 2 个单元产生的反电动势矢量相互抵消,进而减小电路中的总反电动势,使电源电压不再需要大幅超前于电流来克服反电动势,电压与电流的相位差显著减小,从而功率因数得到极大提高。在并联驱动模式下,2 台压缩机在不同支路中独立工作,反电动势抵消效果大幅减弱,故功率因数比串联模式下更低。并联模式下总电流大于串联模式,导致其铜损较大,故其电机效率与串联模式相比更低。

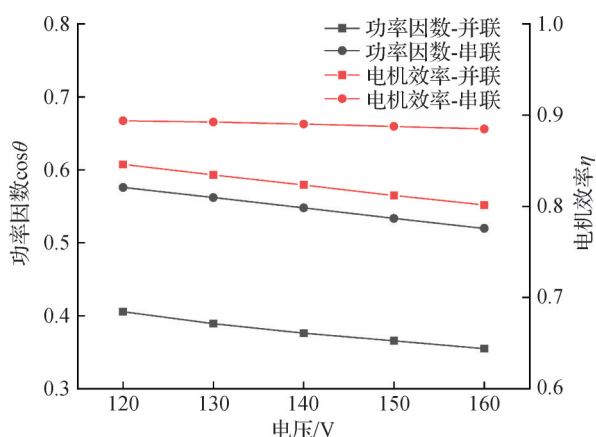


图 8 功率因数和电机效率随电压的变化

Fig.8 Variation of power factor and motor efficiency with voltage

综合分析表明,在相同活塞行程下,并联驱动模式所需的驱动电压显著低于串联模式。针对对置式工质自润滑直线压缩机在高频大行程工况下的运行需求,串联模式所需的总电压一般超出数字电源的输出极限,因此通常需引入串联电容进行无功补偿以提升端电压。然而,变频测试结果显示,相较于电源直驱,电容补偿方案极易诱发行程跳跃现象。

虽然构建 LC 串联谐振回路能有效抵消绕组感抗、降低视在功率需求,但该方案显著削弱了系统的动力学稳定性。这主要是压缩机的气体弹簧刚度具有强非线性特征,电容的引入实质上在机电耦合方

程中引入了一个等效的电气负刚度,导致系统总刚度软化,进而加剧了非线性系统的多值响应与分叉行为。由于气体力随工况动态漂移,在测试过程中进行变频和变容量调节时,难以通过固定电容值来完全规避该共振奇点。相比之下,采用电源直接供电的并联驱动方案虽然牺牲了部分功率因数,但利用了直线电机固有的反电动势阻尼效应。在电源直驱模式下,当动子行程或速度因扰动突增时,反电动势随之升高,直接抑制电枢电流,进而削弱电磁推力,形成了一个天然的负反馈闭环。这种基于物理特性的自平衡能力为压缩机系统提供了极高的鲁棒性,有效抑制了行程跳跃风险,是保障对置式压缩机在变工况下安全稳定测试的有效解决方案。

4 结论

本文针对姿态跟随型热泵用对置直线压缩机的驱动特性进行了实验研究,开发了压缩机样机并搭建了实验台架,在串联和并联驱动模式下进行了直线压缩机的电压和频率调节实验,分析了直线压缩机的冲程响应和电参数依变规律,得到如下结论:

1)当压缩机活塞行程从 7 mm 增至 11 mm,串联模式下总电压平均提升 79.4%,并联模式下总电压平均提升 73%。并联驱动模式下所需供电电压较串联驱动模式更小,该模式下对供电电源的规格要求更为宽松,可以有效拓宽对置直线压缩机的使用范围。

2)在相同频率下,对置压缩机运行至相同行程时,串联所需总电流更小,由于串联模式强制使对置直线压缩机内部 2 台压缩机的电磁力一致,更利于减小行程差异,但当电机性能差异较小时,串并联驱动模式对行程差异的影响较小。

3)串联驱动模式在功率因数和电机效率上较并联驱动模式有优势。当供电电压从 120 V 增至 160 V,串联模式相较于并联模式的功率因数提高 44.9%,平均电机效率提升 8.1%。

本文受低温科学与技术重点实验室重点研究项目资助。
(The project was supported by the Key Research Program of the Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology.)

参考文献

- [1] Brendel L P M, Caskey S L, Ewert M K, et al. Review of vapor compression refrigeration in microgravity environments [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 123: 169-179.
- [2] 贾剑,何永红. 压缩机空调姿态调整机构研究与分析 [J]. 机械, 2019, 46(5): 24-27. (Jia Jian, He Yonghong.

- Research and analysis of a position adjustment mechanism for compressor air conditioner[J]. Machinery, 2019, 46(5): 24–27.)
- [3] Berner F, Savage C. Development of a vapor compression heat pump for space use [C]//16th Thermophysics Conference, 1981: 1113.
- [4] Brendel L P M, Caskey S L, Ewert M K, et al. Vapor compression refrigeration testing on parabolic flights: part 1—cycle stability[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 136: 152–161.
- [5] Liang Kun. A review of linear compressors for refrigeration[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 84: 253–273.
- [6] Zhang Shuo, Tang Mingsheng, Zou Huiming, et al. Design optimization and performance analysis of a self-lubricating linear compressor using vapor injection in a dual-temperature zone refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 176: 79–93.
- [7] 李旋, 邹慧明, 汤鑫斌, 等. 直线压缩机喷射补气特性分析[J]. 制冷学报, 2022, 43(5): 56–63. (Li Xuan, Zou Huiming, Tang Xinbin, et al. Performance analysis of linear compressor with vapor injection[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(5): 56–63.)
- [8] Li Chengzhan, Sun Jian, Zou Huiming, et al. Characteristic analysis and energy efficiency of an oil-free dual-piston linear compressor for household refrigeration with various conditions[J]. Energy, 2023, 270: 126931.
- [9] Zhang Shuo, Zou Huiming, Tang Mingsheng, et al. Study on the friction characteristics of a self-lubricating linear compressor using vapor injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 169: 294–307.
- [10] Wei Yidi, Zuo Zhengxing, Jia Boru, et al. Operational optimisation of a novel dual-piston linear compressor: simulation and experiment [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 132: 82–91.
- [11] Kong Fanchen, Tang Mingsheng, Zou Huiming, et al. Performance simulation analysis of a novel dual-piston two-stage carbon dioxide linear compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 159: 185–194.
- [12] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Barragón-Cervera Á, et al. Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 52: 21–31.
- [13] Tang Zuohang, Zhang Shuo, Zou Huiming, et al. Operational stability influenced by lubricant oil charge in the CO₂ automotive air conditioning system[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 158: 58–67.
- [14] 鲍鑫, 陈新文, 王翔, 等. R1234yf在直线压缩机中替代R134a的实验研究[J]. 低温与超导, 2022, 50(3): 84–87. (Bao Xin, Chen Xinwen, Wang Xiang, et al. Experimental study on R1234yf replacing R134a in linear compressor[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, 50(3): 84–87.)
- [15] Li Zhaohua, Liang Kun, Jiang Hanying. Thermodynamic analysis of linear compressor using R1234yf [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 104: 530–539.
- [16] 左志强, 蒋珍华, 杨宝玉, 等. 脉管制冷机压缩机串并联驱动方式研究[J]. 低温工程, 2025(3): 79–84. (Zuo Zhiqiang, Jiang Zhenhua, Yang Baoyu, et al. Research on series and parallel driving methods of pulse cryocooler compressors[J]. Cryogenics, 2025(3): 79–84.)
- [17] 邱长煦, 潘昱焱, 申运伟, 等. 无油有阀线性压缩机性能测试及优化研究[J]. 低温工程, 2023(2): 18–23. (Qiu Changxu, Pan Yuchi, Shen Yunwei, et al. Experimental and optimization study on characteristics of an oil free valved linear compressor[J]. Cryogenics, 2023(2): 18–23.)

通信作者简介

唐明生, 男, 副研究员, 中国科学院理化技术研究所, E-mail: tangmingsheng@mail.ipc.ac.cn. 研究方向: 新型压缩机及热系统。

About the corresponding author

Tang Mingsheng, male, associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, E-mail: tangmingsheng@mail.ipc.ac.cn. Research fields: novel compressors and thermal systems.