

基于 R290 和 R600a 两种工质的直线压缩机性能对比分析

邹慧明^{1,2} 唐明生^{1,2} 田长青^{1,2,3}

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 在直线压缩机理论模型的基础上，建立了基于 MATLAB 的直线压缩机设计程序，开展了 R290 和 R600a 两种环保工质的直线压缩机进行性能模拟。在同样的运行工况下，R290 工质等效刚度和等效阻尼约是 R600a 的 2.65 倍，需要的供电电压更高，制冷量是 R600a 工质的 3.75 倍，但相比于 R600a 工质 2.0 的 COP, R290 工质的 COP 约为 1.5。为提高 R290 工质直线压缩机的制冷性能，可以从增加电磁力系数、减小间隙泄露两个方面来实现。

关键词 直线压缩机 冷柜 R290 R600a

PERFORMANCE COMPARISON OF LINEAR COMPRESSOR WITH R290 AND R600A

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

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 In this paper a design program on MATLAB is set up based on the basic theoretical model of linear compressor. The performance comparison of linear compressor with R290 and R600a is carried out. The study results show that the equivalent stiffness and damping of the linear compressor with R290 is around 2.65 times of that with R600a. The cooling capacity of the linear compressor with R290 is around 3.75 times of that with R600a. But the COP the linear compressor with R290 is just about 1.5, which is much lower than that with R600a. To improve the performance of the linear compressor with R290, it is necessary to improve the motor constant and decrease the leakage from the gap between piston and cylinder.

Keywords linear compressor, commercial refrigerator, R290, R600a

0 前言

发展安全高效节能、零 ODP、低 GWP 的替代制冷剂已成为当前制冷空调行业可持续发展的一项紧迫而重要的任务。对于商用冷柜这样的小型制冷装置，碳氢 HC_s 制冷剂 R290 或 R600a 具有很好的性能优势，相比于传统的 HFCs，系统能效一般提高 20%以上^[1-3]。由于 HC_s 制冷剂具有可燃性，在小型商用冷柜中得到推广应用需要对其可燃性进行风险评估，Colbourne^[4,5]等人对使用碳氢 HC_s 制冷剂的冷柜进行了可燃性风险进行了量化分析，从泄漏制冷剂泄漏着火概率以及后果的严重性两个方面对压缩机室和房间内可燃性风险进行评估建立了风险评估模型，可以分析热辐射伤害和爆炸超压的事故后果。在充注量得到有效控制的情况下，R290 在小型商用制冷装置上具有很大的发展优势。

基金项目：国家重点研发计划 2016YFD0400905，国家自然科学基金 51576203、51505466
作者简介：邹慧明，（1977- ），女，副研究员，研究方向为制冷空调新技术

压缩机是蒸汽压缩式制冷系统的关键部件，目前冰箱、冷柜这类小型制冷装置主要采用活塞式压缩机以保证较高的容积效率。直线压缩机采用直线电机驱动活塞，取消了旋转驱动和往复压缩之间的转换装置，结构更加紧凑，传动效率更高，易于实现无油或少油润滑，且变容量特性优异，具有很大的节能潜力^[6,7]。本文在 R600a 冰箱压缩机的开发研究基础上，针对基于 R290 和 R600a 两种环保工质的直线压缩机进行性能分析对比，为 R290 冷柜用直线压缩机的开发及性能优化提供理论依据。

1 设计工况

根据冷柜和冰箱用压缩机的设计要求，额定工况为：蒸发温度-23.3℃，吸气温度 32.3℃，冷凝温度 54.4℃，过冷温度 32.2℃（环境温度 32.2℃）。

制冷工质为 R600a，绝热指数（ κ ）1.07，压缩机吸气压力（ p_s ）0.062MPa，排气压力（ p_d ）0.76MPa。理论循环的制冷量 $q_e=334.83\text{kJ/kg}$ ，压缩机指示功 $P_c=116.22\text{W/kg}$ ，理想制冷 $\text{COP}_i=2.88$ ，吸气密度 $\rho=1.443\text{kg/m}^3$

制冷工质为 R290，绝热指数（ κ ）1.11，压缩机吸气压力（ p_s ）0.217MPa，排气压力（ p_d ）1.883MPa。理论循环的制冷量 $q_e=356.87\text{kJ/kg}$ ，压缩机指示功 $P_c=130.88\text{W/kg}$ ，理想制冷 $\text{COP}_i=2.73$ ，吸气密度 $\rho=3.892\text{kg/m}^3$

2 理论模型与模拟程序

在直线压缩机的设计阶段，为了简化计算，通常采用傅里叶算法将非线性气体力进行线性化处理，得到气体力的等效刚度、等效阻尼等参数，并结合活塞运动过程中受到的电磁力、摩擦力、惯性力及弹簧力的作用，建立直线压缩机的动力学模型，如式（1）：

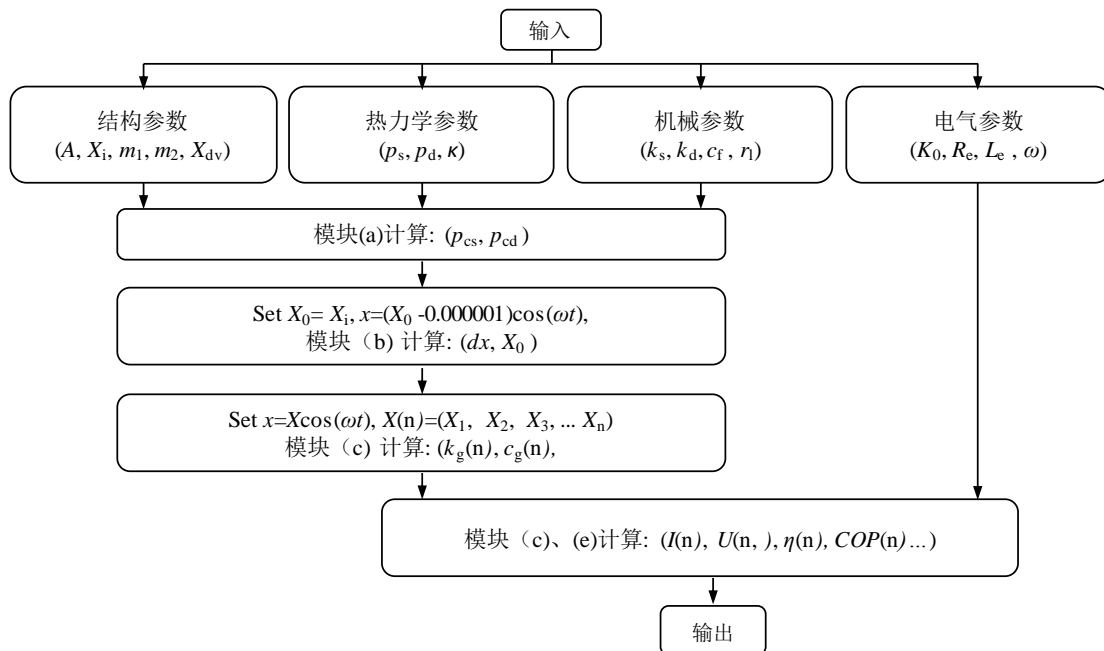
$$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{d^2 x}{dt^2} + (c_f + c_g) \frac{dx}{dt} + (k_s + k_g) x = K_0 i \quad (1)$$

将线圈电阻与铁芯损耗简化为等效电阻，线圈电感与铁芯感应简化为等效电感，直线电机的电路模型如式（2）

$$R_e i + L_e \frac{di}{dt} + K_0 \frac{dx}{dt} = u \quad (2)$$

其中， m_1 为动子质量， m_2 为机身质量， c_f 为压缩机摩擦阻尼， c_g 为气体力等效阻尼， k_s 为弹簧刚度， k_g 为气体力等效刚度， K_0 是电机电磁力系数， R_e 是压缩机等效电阻， L_e 是压缩机等效电感。

根据上述模型，基于 Matlab 平台建立直线压缩机设计程序，计算流程及算法如图 1 所示。



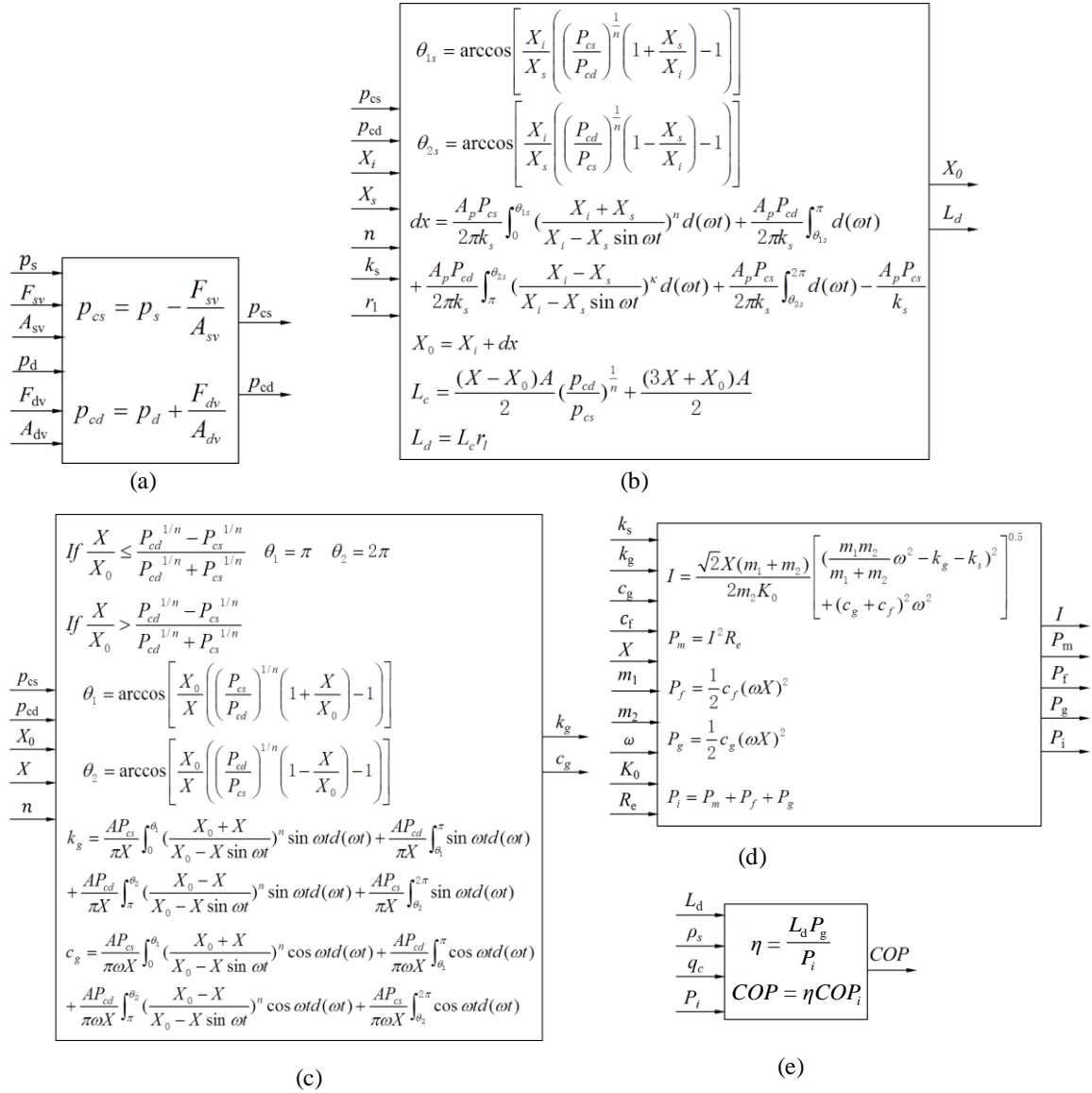


图 1. 直线压缩机设计程序框图

根据直线压缩机的应用对象需求，将已知参数输入设计程序，通过试算进行压缩机参数配置，经过反复试算，配置如表 1。

表 1 直线压缩机主要参数

参数	R600a	R290
气缸直径, d	0.036m	0.036m
设计行程, H	0.012m	0.012m
设计频率, f	60Hz	70Hz
运动部件质量, m_1	0.75 kg	0.99 kg
机身质量, m_2	6.0 kg	6.3 kg
电磁力系数, K_0	85 N/A	85 N/A
等效电阻, R_e	6.86 Ω	6.86 Ω
等效电感, L_c	0.378H	0.378H
气体等效刚度, k_g	29400N/m	87540N/m
谐振弹簧刚度, k_s	58800 N/m	85700 N/m
偏移量, dx	0.002 m	0.0039 m
初始余隙, X_i	0.004m	0.0021m

3 分析与讨论

在上述直线压缩机基本参数的配置基础上，针对 R290 和 R600a 这两种工质在额度工况下进行制冷性能模拟计算。

图 2 为气体等效刚度与等效阻尼随行程变化曲线。总行程 12mm，气体等效刚度随着行程的增加逐步升高，R290 工质等效刚度从 40000N/m 增加到 140000N/m，R600a 工质等效刚度从 10000N/m 增加到 49000N/m。当压缩机气缸内的压力大于排气压力时排气阀打开，压缩机开始泵气，R290 工质开始泵气的行程为 9.24mm；R600a 开始泵气的行程为 10.18mm，泵气前气体等效阻尼均为 0Ns/m。泵气后，随着行程继续增加，气体等效刚度开始下降，气体等效阻尼逐步增加，直到活塞到达上死点位置，R290 工质等效刚度下降到 78000N/m，等效阻尼增加到 122 Ns/m，R600a 工质等效刚度下降到 29000 N/m，等效阻尼增加到 46 Ns/m。当活塞行程冲过上死点后，气体等效刚度开始反转上升，等效阻尼反转下降。可以看出，R290 和 R600a 两种工质在同样的直线压缩机气体条件下，气体力特性有很大差距，以上死点位置为例，R290 工质等效刚度和等效阻尼约是 R600a 的 2.65 倍。因此设计过程中需要根据各自的参数特性进行频率参数配置。

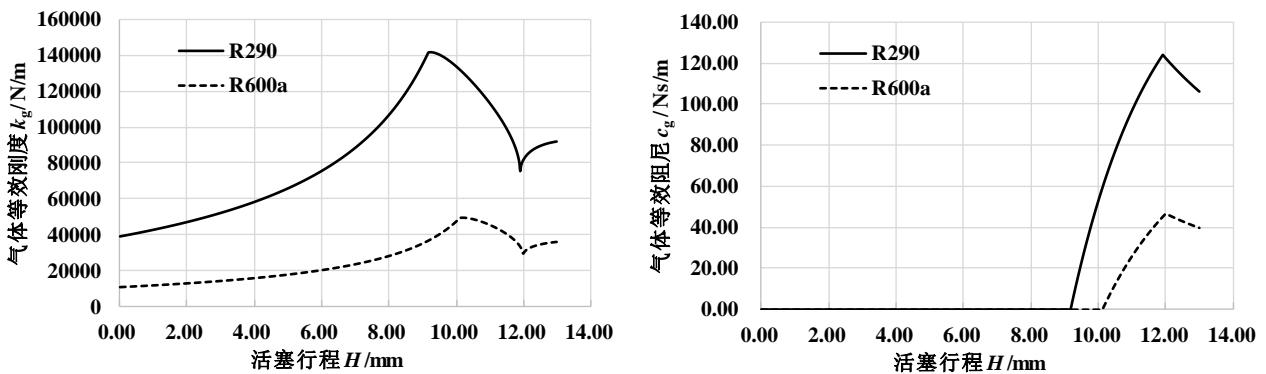


图 2 气体等效参数随行程变化

图 3(a) 为在表 1 的配置参数基础上，两种工质需要的供电电压变化曲线。随着行程的逐步增加，供电电压 U 呈非线性上升趋势，当直线压缩机开始泵气后，电压略有上升后开始又缓慢降低，R290 工质需要的电压为 614V，R600a 电压为 210V。可以看出，R290 工质需要的电压要求太高，电压变化曲线的非线性特性会很大程度上增加行程控制的难度。进一步，考虑在直线压缩机的供电回路中串联 $15\mu F$ 的电容，图 3(b) 为串联电容后的计算结果，可以看出，此时直线压缩机行程增加需要的电压值得到了大幅降低，R290 工质需要的电压为 191V，R600a 电压为 146V，同时电压与行程关系曲线的线性度也有了很大的提升。

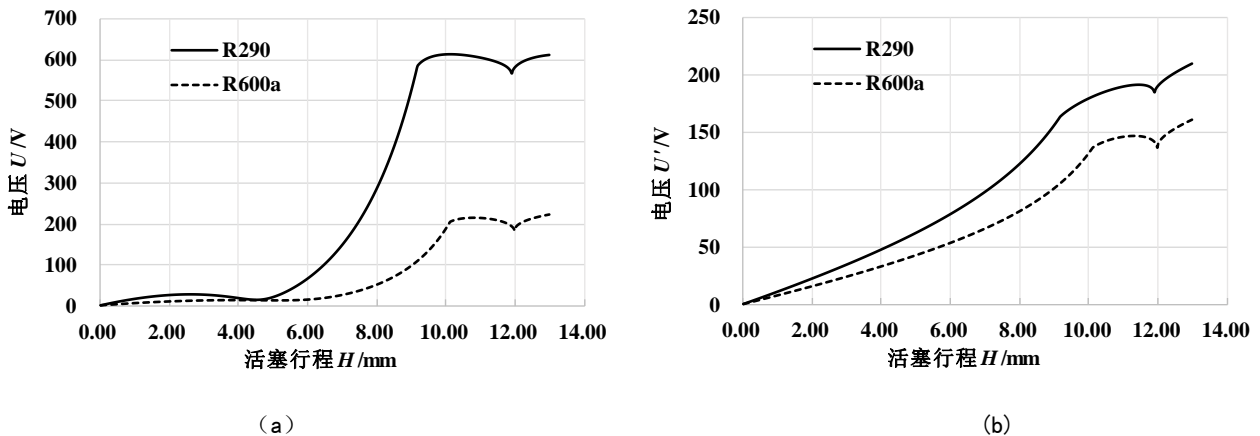


图 3 供电电压随行程变化

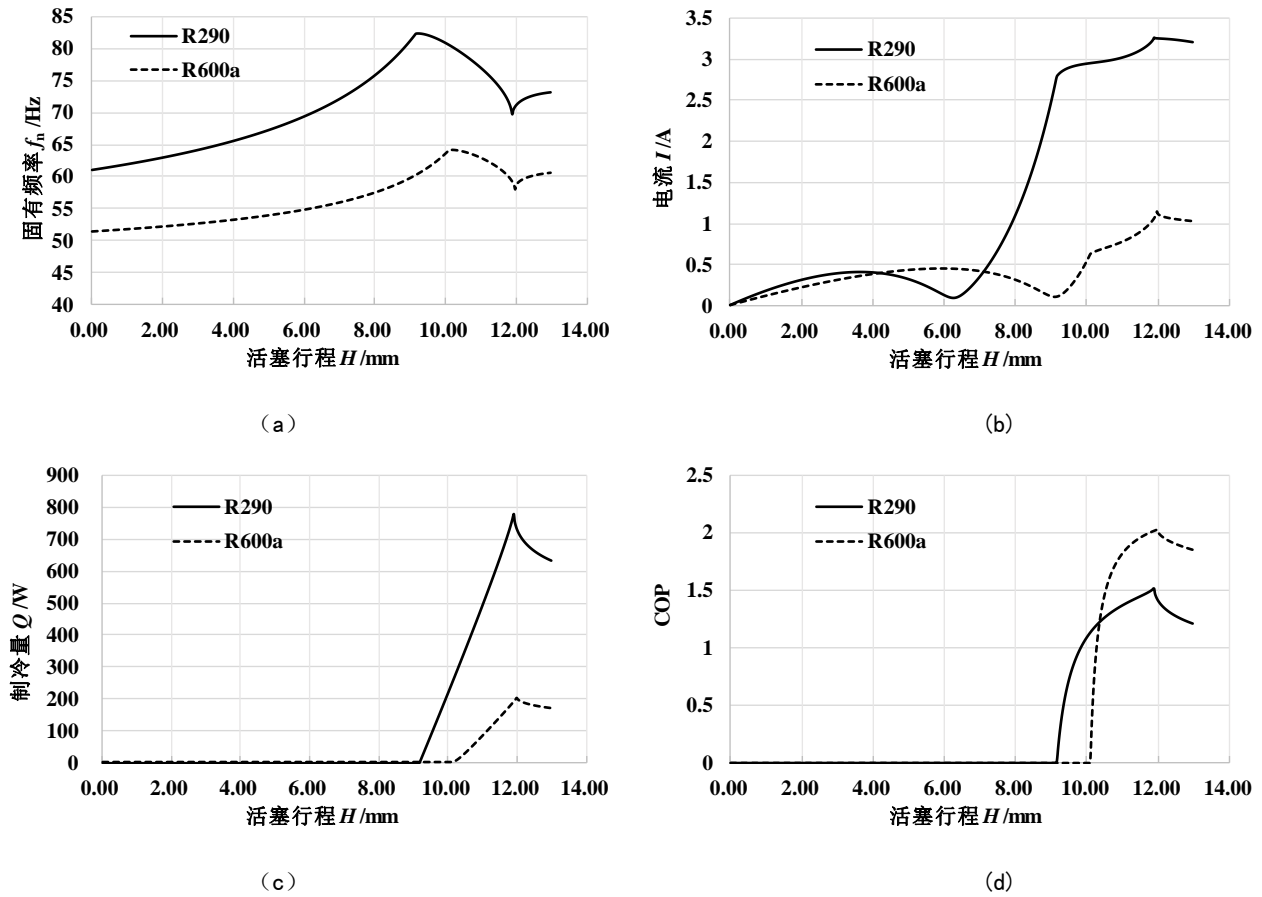


图 4 性能参数随行程变化

由于两种工质气体等效刚度的差异较大,通过动子质量、弹簧刚度的分别配置(表 1),得到直线压缩机的固有频率变化曲线如图 4(a)所示,在上死点位置,两种工质的固有频率与设计频率接近,值得注意的是在泵气的行程区间内,固有频率变化较大,控制系统需通过频率追踪来保证较高的电机效率。图 4(b)为直线压缩机的电流曲线,受气体力非线性影响,电流随行程变化具有显著的非线性特性,两种工质在上死点位置的电流约为 3.25A 和 1.10A。图 4(c)和 4(d)为两种工质的制冷量与 COP 变化曲线,上死点位置, R290 的制冷量约为 750W, COP 为 1.5, R600a 的制冷量约为 200W, COP 为 2.0。可以看出,同样的气缸活塞配置条件下,由于 R290 本身的热物性,制冷量是 R600a 工质的 3.75 倍,但 COP 却比 R600a 工质的小很多,这是由于一方面在同样的直线电机条件下, R290 工质的电流更大,电机效率相对较低,另一方面, R290 工质的活塞两侧压差更大,压缩腔向背压腔泄露更大。因此对于 R290 工质的直线压缩机,为提高其制冷性能,还需要一方面增加电磁力系数来降低运行电流,提高直线电机的效率,另一方面通过气缸活塞间隙的优化设计减少压缩气体的泄露,提高压缩效率。

4 结论

通过上述 R290 和 R600a 两种工质的直线压缩机性能模拟分析,得到以下主要结论:

- (1) 两种工质在同样的运行工况条件下,气体力特性有很大差距,以上死点位置为例, R290 工质等效刚度和等效阻尼约是 R600a 的 2.65 倍,设计过程中需要根据各自的参数特性进行频率参数配置。
- (2) 在同样的直线电机参数条件下, R290 需要的供电电压较高,通过在供电回路中串联电容的方法,降低无功电压,提高直线压缩机的运行功率因素,同时提升电压与行程关系曲线的线性度,降低行程控制难度。
- (3) 同样的气缸活塞配置条件下,由于 R290 本身的热物性,制冷量是 R600a 工质的 3.75 倍,但由于 R290 工质的电流更大,电机效率相对较低,两侧压差更大,压缩腔向背压腔泄露更大,使得制冷 COP 比 R600a 工质小很多。
- (4) 为提高 R290 工质直线压缩机的制冷性能,需要从增加电磁力系数、减少气缸活塞间隙泄露两

个方面来实现。

参 考 文 献

- [1]Rene Van Gerwan,Alan Gerrard,Fabio Roberti. Ice cream cabinets using a hydrocarbon refrigerant: from technology concept to global rollout 2008.
- [2]何 广. R290 制冷剂在商用制冷柜领域的应用与研究.中国新产品新技术.2014.7
- [3]叶俊荣.R290 制冷剂在商用冷柜中的应用.化工管理. 2015.9
- [4]D Colbourne , L Espersen. Quantitative risk assessment of R290 in ice cream cabinets. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4):1208–1219.
- [5]钱文波, 晏刚, 冯永斌等. 丙烷和丙烯用于低温冷柜的性能和充灌量研究.西安交通大学学报, 2009,43(9):104-108.
- [6]Heo K B, Lee C W, Song G Y, et al. Capacity Modulation of Linear Compressor for Household Refrigerator. Science & Technology of Household Electric Appliance, 2004.
- [7]Huiming Zou, Mingsheng Tang, ChangqingTian, et al. Performance characteristics around the TDC of linear compressor based on whole-process simulation. International Journal of Applied electromagnetics and mechanics.2014,28(10):4163-4171.(SCI)