

# 冰箱用直线压缩机系统开发

徐海峰, 杨坤, 满长才, 朱魁章

(中国电子科技集团公司第十六研究所, 合肥 230043)

摘要: 直线压缩机具有效率高、结构简单、体积小、容量调节性能优异等优点, 是目前冰箱用压缩机的一个发展热点。文中介绍了冰箱用直线压缩机的结构设计、动磁式直线电机设计及直线电机的控制方法。

关键词: 冰箱; 直线压缩机; 动磁式直线电机

## The development of linear compressor system used in fridge

Xu Haifeng, Yang Kun, Man Changcai, Zhu Kuizhang

(The 16th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230043, China)

**Abstract:** The linear compressor with some advantages of high efficiency, simple structure, small volume and adjustable volume etc, is a hot spot for the fridge development at present. The structure design, moving-magnet linear electrical machine design and the controlling methods for linear compressor used in fridge were introduced in this paper.

**Keywords:** Fridge, Linear compressor, Moving-magnet linear electrical machine

## 1 引言

随着我国国民经济水平及物质需求的不断攀升, 冰箱成为人们日常生活中不可或缺的电器之一。近年来城镇化趋势加快, 促进了四、五级及农村市场冰箱的强烈需求, 以及受国家家电节能惠民政策影响及国内对冰箱行业的节能补贴逐渐增多, 消费者对于节能性的关注增加, 各大冰箱生产商转型生产高端节能冰箱。在我国城乡居民的家庭用电量中, 30% ~ 40% 左右为电冰箱用电, 其中

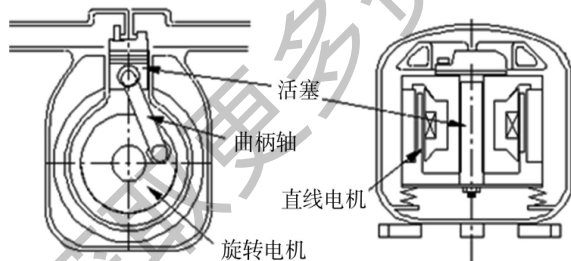


图 1 旋转式压缩机与直线压缩机结构对比图

Fig. 1 The structure comparison between rotary compressor and linear compressor

压缩机消耗 80% 以上电量, 是电冰箱中最主要的耗能部件<sup>[1]</sup>。因此如何通过提高冰箱用制冷压缩机的工作效率, 最大限度地节约能耗成为国内

外的主要研究内容之一。直线压缩机采用直线电机驱动(见图 1 左), 由于省去了传统往复式压缩

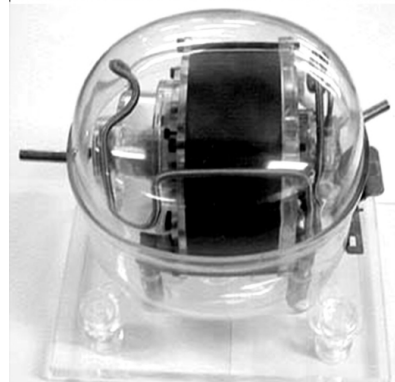


图 2 美国 Sunpower 公司与韩国 LG 生产的直线压缩机  
Fig. 2 The linear compressors produced respectively by Sunpower in USA and LG in Korea

收稿日期: 2013 - 12 - 23

作者简介: 徐海峰(1986 -), 男, 硕士, 研究方向: 斯特林制冷及节流制冷。

机由旋转运动转换为直线往复运动的传动机构，直线电机的电磁驱动力方向始终与活塞的运动方向在同一直线上，活塞将不存在径向力或径向力非常小，极大地减少了活塞的摩擦功耗和磨损，易于实现无油润滑<sup>[2]</sup>；具有尺寸小、结构简单、效率高、可靠性高、易于封装、控制方便、成本低等特点，因此直线压缩机受到国内外的广泛青睐。美国 Sunpower 公司 1991 年在美国环保局的资助下开始线性压缩机的研究；韩国 LG 公司经八年时间设计和开发的直线压缩机已成功应用于 LG 冰箱产品中，并获得 500 多项专利；巴西 Embraco 公司与新西兰 Fisher & Paykel 公司进行合作，经过 5 年时间的研发，花费 2000 万美元在 2010 年成功研发出无油润滑的直线压缩机<sup>[3]</sup>。

## 2 直线压缩机结构设计

直线压缩机结构主要由直线电机系统、吸排气系统及油路系统四部分组成。以直线电机为核心动力部件，合理设计吸排气系统及布局以适合直线电机的结构特征。其主要结构特点为：吸气通路在中空的活塞内腔中，通过位于活塞顶端的吸气阀进入气缸，被压缩后从位于气缸端头的排气阀排出。这种结构的优点在于，直线压缩机的活塞行程是随着外部载荷工况的变化动态变化的，因而可能会出现活塞冲缸的现象，为保证压缩机的可靠运行和长寿命，采用非金属复合材料的排气阀配合螺旋弹簧的排气装置可以很好地减小活塞冲缸带来的损害。直线压缩机的结构示意图见图 3。

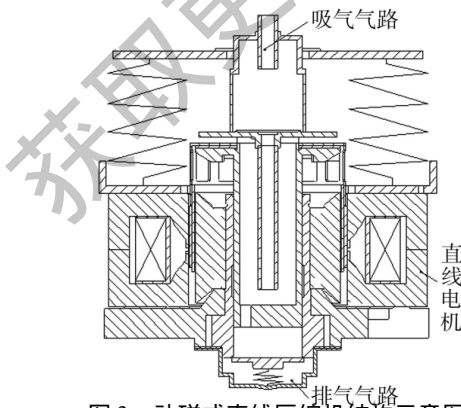


图 3 动磁式直线压缩机结构示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the moving - magnet linear compressor structure

压缩机制冷性能试验依据国家标准 GB/T 5773 - 2004《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》采用“第二制冷剂量热器法”作为主要测量方法，“水冷冷凝器量热器法”作为辅助测量方法而进行。在标准压缩机性能实验台上，以 R600a 为制冷剂，测得线性压缩机样机在额定工况下输入功率 157.8W，制冷量达到 284W，COP 为 1.8。并且该线性压缩机在小幅调整驱动电压和频率的基础上，可实现 40—100% 的制冷变容量调节。

## 3 直线电机设计

直线压缩机是采用直线电机驱动的压缩机。根据驱动方式，直线电机可分为：直线感应电机、直线同步电机、直线直流电机、直线振动电机。直线电机驱动器是线性压缩机最重要部件。理论上讲，任何一种直线电机都可以成为直线压缩机的驱动器。根据电冰箱用直线压缩机的工作特点，目前为止，国内外绝大多数的研究都采用了动磁式直线振荡电机作为线性压缩机的驱动器，其基本原理是通过在静止不动的线圈中通以交变电流，产生变化磁场，并与永磁体构成的动子所产生的磁场相互作用，使动子直接往复运动。一般直线电机为 Redlich 型圆筒式结构，具有结构紧凑、漏磁较小等特点，通过优化设计，可以获得稳定的行波磁场，使动子在磁场中平稳运动。配以不同规格的谐振元件后，可针对不同的负载条件获得较高的效率。

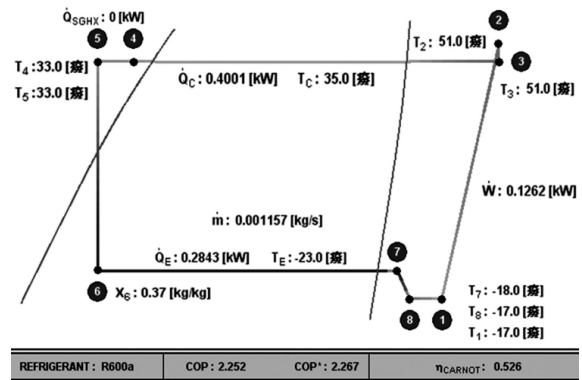


图 4 冰箱工况下的制冷循环图

Fig. 4 The refrigeration cycle under refrigeration condition

根据制冷原理，与满足性能指标所规定的工况下的制冷能力，直线压缩机需要提供与之对应的吸排气压力。直线压缩机的受力有：往复运动

产生的惯性力; 活塞和汽缸摩擦产生的摩擦力 (抑制力); 弹簧弹力; 在汽缸压缩和缓冲空间工质压缩和膨胀过程由于压差产生的力; 电流产生的电子力。欲使直线电机能够克服上述力并产生满足设计要求的压比, 则需要对电机进行优化设计。

对于直线电机的推力可以通过建立电机等效磁路图进行推算, 对于动磁式直线电机其电磁推力一般为<sup>[4]</sup>:

$$F_{\epsilon} = \frac{\partial \psi_{pm} i}{\partial x} = N_t W_{pm} (B_{g1} + B_{g2}) N_w i = k_i i \quad (1)$$

$$\Delta \psi_{pm} = N_t W_{pm} (B_{g1} + B_{g3}) N_w \Delta x \quad (2)$$

式中,  $F_{\epsilon}$  为电磁力,  $N_w$  为每极绕组匝数,  $W_{pm}$  为单块永磁体圆周宽度,  $B_{g1}$  为增磁侧气隙磁密,  $B_{g3}$  为弱磁侧气隙磁密,  $N_t$  为永磁体块数,  $k_i$  为电磁力系数。则由式(1)分析可知, 电磁力主要与绕组电流、永磁体圆周宽度、气隙磁密以及绕组匝

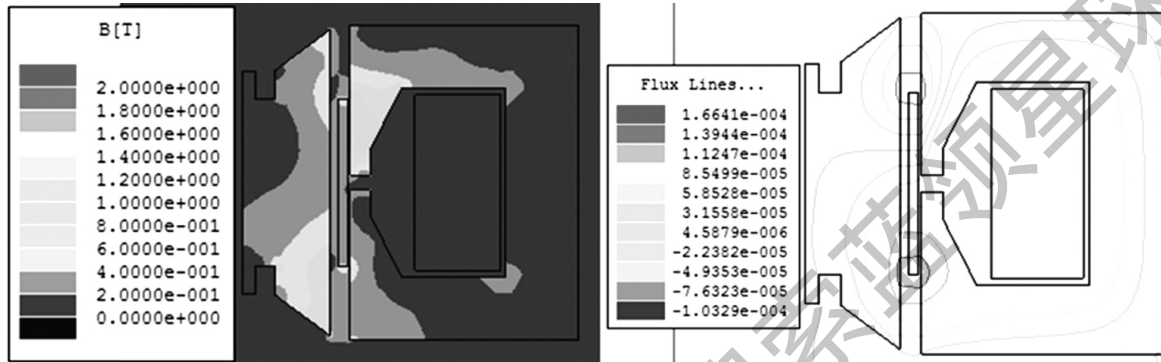


图 5 直线电机磁路分析

Fig. 5 The magnet analysis of linear electrical machine

数等参数有关。图 5 为应用电磁仿真分析软件 Ansoft 对直线电机磁路分析结果。

#### 4 直线电机的控制方法

直线压缩机由于无曲柄连杆机构, 压缩机活塞的止点位置必须通过控制系统保证, 这首先需要检测活塞点位置, 早期的系统都选择位置传感器的检测信号作为负反馈, 控制线圈上的冲程电压来实现。但系统中增加传感器后, 一方面系统可靠性和灵敏度不能保证, 另外还增加了成本。因此开发无传感器的控制系统就成为另一种选择<sup>[5]</sup>, 控制系统的控制变量主要有活塞位移、活塞速度、活塞运动相位和气缸内外温度等, 其中选择活塞位移为控制变量的较为普遍。因此, 如何获得活塞的位置与输入电流、电压的关系信息即成为控制实现的关键。

改变线圈中的电流(或电压)是一种较常采用的方法, 只要改变输入电压的导通角就可控制电流的大小, 这方法能适应不同的工况(如起动、正常运行等), 对由于加工、安装误差引起的各个压缩机不同的余隙容积、静平衡位置, 还可以通过微调线圈的匝数来保证批量产品的一致性。用

改变电流(电压)控制活塞位置的方法首先应获得(计算、试验)电流或电压与活塞位移的变化关系, 然后采用模式识别的方法来控制压缩机运行, 即用对应于计算的位移和检测的电流的轨迹来检测模式, 然后将检测的模式与基准模式进行比较, 当它们彼此一致时输出开关控制信号, 最后根据开关控制信号来调节冲程电压<sup>[6]</sup>。

#### 5 总结

韩国 LG 公司开发的 R600a 家用冰箱直线压缩机, 通过改进阀门系统获得高的能效比, 比传统 R600a 压缩机的能效比高 25% ~ 30%, 电动机效率超过 90%。国外对直线压缩机的研究和试验处于领先地位, 已建立相关的理论分析、设计方法和生产标准, 但关键技术均对外保密。国内对直线压缩机的研究无论广度和深度与国外相比都存在较大差距, 尤其在理论设计和控制研究等方面。国内高校及科研院所近年来对直线压缩机积极进行研究, 中国电子科技集团公司第十六研究所一直致力于直线电机驱动的斯特林制冷机的研发工作, 对直线电机具有丰富的研发经验, 近两年开始对冰箱及空调用直线压缩机进行开发及研

(下转 52 页)

极限热流密度。结果表明,随着流量增加,表面温度与压降呈相反变化趋势,且存在一个最佳工况点,该工况点处的工质流量随表面热流密度的增加而增大;综合考察传热和压降,高宽比大的槽道表现出较好的综合性能;本文所设计的细小槽道热沉在流量为 1.3~4.75L/min 范围内、表面温度控制在 70℃ 时所能承受的极限热流密度为 70W/cm<sup>2</sup>,此时压降约为 170kPa。

### 参考文献

- [1] Tuckerman D B, Pease R F. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device, 1981, 2(5): 126-129.
- [2] Pfahler J, Harley J, Bau H H, et al. Gas and liquid flow in small channels [J]. Micromechanical Sensors, Actuator and Systems, ASME-DSC, 1991, DSC-32: 49-60.
- [3] Liu Z, Zhao Y. Experimental study on visualization of the flow field in microtube [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2005, 48(5): 521-529.
- [4] Hrnjak P, Tu Xiao. Single phase pressure drop in microchannels [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 2007, 28(1): 2-14.
- [5] 鲁进利, 韩亚芳, 陈永平. 不锈钢微细圆管中去离子水流动特性 [J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3119-3124.
- [6] Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtube [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1999, 20(2): 142-148.
- [7] Wu H Y, Cheng Ping. Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, 46(14): 2519-2525.
- [8] Dutkowski K. Experimental investigations of Poiseuille number laminar flow of water and air in microchannels [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, 51(25-26): 5983-5990.
- [9] Vafai K, Zhu L. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(12): 2287-2297.
- [10] Chen Y P, Cheng P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(13): 2643-2648.
- [11] Colgan E G, Furman B, Bezama R J. A practical implementation of silicon micro-channel coolers for high power chips [J]. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions, 2007, 30(2): 218-225.
- [12] Alharbi A Y, Pence D V. Thermal characteristics of microscale fractal-like branching channels [J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(5): 744-752.
- [13] 赵孝保, 卢玲, 刘志刚, 等. 微/小圆柱针肋热沉传热特性 [J]. 化工学报, 2011, 62(3): 672-677.
- [14] 鲁进利, 周宾, 许忠林, 等. 不同截面微通道中流动阻力特性 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(3): 554-557.
- [15] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 1988, 1(1): 3-17.

(上接 47 页)

究。希望通过科研人员不断地进行技术探索和创新能够拥有自主研发的直线压缩机,打破国外的技术垄断,为国家及社会带来巨大的经济和社会效益,促进地区和整个社会的经济发展。

### 参考文献

- [1] 邹慧明, 张立钦, 彭国宏, 等. 电冰箱用线性压缩机的研究与开发 [J]. 家电科技, 2013, 66-69.
- [2] Redlich R, Unger R, Van der Walt N R. Linear Compressors: Motor Configuration, Modulation and Systems [C]. In: Proceeding of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, Purdue Univ., 1996, 23-26.
- [3] Zou Huiming, Zhang Liqin, Peng Guohong, et al. Piston Stroke Design Optimization for Linear Compressor [J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 1635-1640.
- [4] 王玮. 动磁式线性压缩机的有限元分析 [J]. 微电机, 2011, 6(44): 20-23.
- [5] Sanada M, Mori Moto S, Takeda Y. An analysis for sensorless linear compressor using linear Pulse motor: IEEE Industry Applications conference (34th IAS Annual Meeting) [C]. Phoenix, Arizona, 1999: 2298-2304.
- [6] 朴埃亨, 黄仁永. 利用模式识别来控制线性压缩机运行的设备和方法. 中国, 01142. X [P], 2002-07-03.