

〈制冷技术〉

分置式斯特林制冷机气动膨胀机阶梯轴振子运动特性研究

江重桦，陈晓屏，夏明，李海英，黄伟，陈军

(昆明物理研究所，云南 昆明 650223)

摘要：对气动分置式膨胀机振子进行运动分析和实验验证，说明随气动杆面积增加，振子相角减小、振幅增加；将直连结构与气动杆结构制冷机性能进行对比，介绍了阶梯轴面积比会影响制冷机的压缩机和膨胀机匹配，实际研发中应结合压比、相角、振幅几方面确定阶梯轴面积；分析了阶梯轴结构膨胀机的宽频工作特性。

关键词：斯特林制冷机，气动膨胀机，阶梯轴结构，振子振幅，振子相角

中图分类号：TB651 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2014)01-0068-05

Motion Characteristics Study on the Stepped-rod Type Vibrator in Pneumatic Expander of Split-Stirling Cryocooler

JIANG Chong-hua, CHEN Xiao-ping, XIA Ming, LI Hai-ying, HUANG Wei, CHEN Jun

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The vibrator in pneumatic expander of split-stirling cryocooler was analyzed and verified. With pneumatic rod area increases, vibrator's phase angle decreases, while stroke increases. The cooling capacity of Stepped-rod type was compared with direct-connected type's. The stepped-rod area rate will affect the matching of the expander to the compressor. The pressure ratio, phase angle and amplitude were considered to determine the area of the stepped-rod. The stepped-rod type expander's wide frequency adapt characteristics is also analyzed.

Key words: stirling cryocooler, pneumatic driver, stepped-rod, stroke, phase angle

0 引言

分置式斯特林制冷机具有高可靠性、低振动、低噪音、安装灵活等优点。根据其膨胀机驱动方式不同，可分为气动式和牛津型两种结构。其中气动式分置式制冷机因其控制简单、结构紧凑、成本较低，而广泛用于武器平台和空间应用、超导滤波等领域^[1]。

回热式制冷机获得冷量的基本条件为：体积、压力的周期性变化，以及体积变化与压力变化之间保持匹配的相位角^[2]。与集成整体式或牛津型制冷机不同，气动膨胀机的运动部件即振子部件仅由压缩机产生的工质压力波推动，给定压力波后，膨胀腔体积变化及相位关系依赖于膨胀机振子结构，为振子设计带来较大难度。相位控制一直是气动膨胀机的设计要点，但关于振子的阶梯杆设计，国内外

收稿日期：2013-03-01；修订日期：2013-11-17。

作者简介：江重桦（1980-），男，硕士研究生，主要从事斯特林制冷机研究。

鲜有讨论^[3-5]。本文针对某项目对大冷量长寿命分置式斯特林制冷机的设计要求，设计了直连和阶梯轴两种结构振子，对振子的运动特性进行了理论分析与实验研究。

1 膨胀机振子结构介绍

气动分置式斯特林制冷机膨胀机振子有2种结构，直连型及阶梯轴型。直连型膨胀机结构如图1所示。膨胀机内部空间被蓄冷器（回热器）分割为冷腔与热腔，两腔体通过蓄冷器内部连通。振子受膨胀腔、热腔压力和阻尼共同作用往复运动做功制冷。这种结构的优点是制造工艺简单，目前多数气动分置式斯特林制冷机如英国COBHAM、德国AIM、法国THALES公司的大多数产品均采用该结构。

阶梯型膨胀机如图2所示，因其活塞有两级、呈阶梯状而得名。它通过阶梯活塞将膨胀机的热端

分为气动腔和热腔2个部分, 弹簧位于气动腔内, 气动腔、热腔之间采用间隙密封, 气动腔的压力与充气压力基本一致。蓄冷器部件通过膨胀腔、热腔和气动腔三者压力以及阻尼共同作用来做功制冷。这种膨胀机特点是热腔非常紧凑, 可通过阶梯轴对振子振幅及相位进行调整, 此外若在气动腔采用板弹簧支撑, 可以使膨胀机可靠性达到很高水平, 如THALES公司为ESA空间应用研发的LSF9330制冷机^[5], 缺点是阶梯轴的制造工艺复杂。目前生产该结构制冷机主要有以色列RICOR公司。

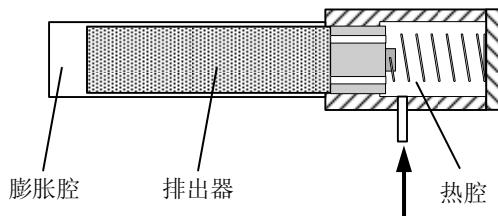


图1 直连型膨胀机结构示意

Fig.1 Sketch of the direct-connected type expander

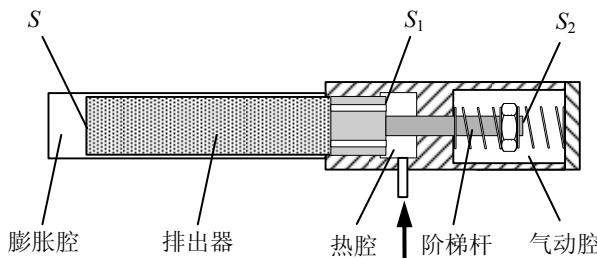


图2 阶梯型膨胀机结构示意

Fig.2 Sketch of the stepped-rod type expander

2 动力特性分析

对阶梯轴结构的膨胀机振子进行受力分析。膨胀机振子部分包括蓄冷器、膨胀活塞和弹簧3部分, 由蓄冷器两端膨胀腔、热腔、气动腔3个腔体的压差来驱动。膨胀腔和热腔内工质以近似正弦波的压力波分别作用在活塞S、S₁面, 气动腔内工质以近似固定压力P₀作用在S₂面, 其压力大小等于充气压力, 如图2所示。设阶梯杆面积S₂为总面积S的η倍(0≤η<1), 当η=0时, 热腔与膨胀腔面积相等, 气动腔对振子无影响, 成为直连结构。所以直连结构在动力分析上是η=0的特殊情况。

根据上述分析, 假设热腔的压力为P_h, 膨胀腔的压力为P_c, 分别写作:

$$P_h = P_{h0} \sin \theta t + P_{h1} \quad (1)$$

$$P_c = P_{c0} \sin(\theta t - \alpha) + P_{c1} \quad (2)$$

$$S_1 = (1 - \eta)S, S_2 = \eta S \quad (3)$$

式中: P_{h0}为热腔压力幅值; P_{c0}为膨胀腔的压力幅值; P_{h1}为热腔压力平衡点值; P_{c1}为膨胀腔压力平衡点值; θ为角频率; t为时间; α为膨胀腔压力波落后热腔压力波相位差; η为阶梯杆面积比。

作用在蓄冷器上的压力差F可以写作:

$$\begin{aligned} F &= P_h S_1 + P_0 S_2 - P_c S \\ &= (P_{h0} \sin \theta t + P_{h1}) S_1 + P_0 S_2 - \\ &\quad (P_{c0} \sin(\theta t - \alpha) + P_{c1}) S \end{aligned} \quad (4)$$

经整理得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = PS \sin \psi t + ((1 - \eta)P_{h1} + \eta P_0 - P_{c1})S \\ P = \sqrt{((1 - \eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha)^2 + (P_{c0} \sin \alpha)^2} \\ \psi t = \theta t + \arctan \frac{P_{c0} \sin \alpha}{(1 - \eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha} \end{array} \right. \quad (5)$$

从式(5)可知, 蓄冷器同时受到一个简谐激励和一个固定压力作用。固定压力只改变回热器静平衡位置, 对回热器振子的振动规律没有影响。直连结构为η=0的特殊情况。

膨胀机振子运动可近似视为有粘性阻尼的单自由度受迫振动^[6]。其中阻尼包括摩擦阻尼以及工质气体流经蓄冷器的粘滞阻尼。对振子建立运动方程如下:

$$-my'' -cy' -ky + F \sin \psi t = 0 \quad (6)$$

式中: m为振子质量, c为阻尼系数, k为振子刚度, y为位移, F为激励力。

解方程(7), 得到稳态强迫振动建立时的解为:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = A \sin(\psi t - \varphi) = A \sin(\theta t - \beta) \\ A = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \frac{PS}{m\omega^2} \\ \beta = \varphi - \arctan \frac{P_{c0} \sin \alpha}{(1 - \eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha} \\ \varphi = \arctan \frac{2\xi\gamma}{1 - \gamma^2} \\ \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \gamma = \frac{\theta}{\omega}; \xi = \frac{c}{2m\omega} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: y为振子沿冷指方向位移, A为振子振幅; γ为激励频率与振子本征频率比, ω为系统本征频率; ξ为阻尼比; φ为振子位移落后于激励力的相角; β为振子位移落后于热腔压力波相角。

将β与A对η求偏导:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \beta}{\partial \eta} = \frac{-P_{h0} P_{c0} \sin \alpha}{1 + \left(\frac{P_{c0} \sin \alpha}{(1-\eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha} \right)^2} \\ \frac{1}{((1-\eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha)^2} < 0 \\ \frac{\partial A}{\partial \eta} = \frac{-2((1-\eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha)P_{h0}}{2\sqrt{((1-\eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha)^2 + (P_{c0} \sin \alpha)^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \frac{S}{m\omega^2} \\ \frac{\partial A}{\partial \eta} = 0 \Rightarrow \eta_{A\min} = 1 - \frac{P_{c0}}{P_{h0}} \cos \alpha ; \end{array} \right. \quad (8)$$

从(8)式可见，随面积比增加，相角 β 减小。对于液氮温区的蓄冷器，其压力降和相差均较小，因此使压力幅值极小的 $\eta_{A\min}$ 值也较小，例如，取 $P_{h0}=4\text{ bar}$, $P_{c0}=3.8\text{ bar}$, $\alpha=10^\circ$, 则 $\eta_{A\min}=0.064$ 。超过该极小值，则随着阶梯轴面积增加，蓄冷器所受简谐力增大、振幅增加。

同时，可得到膨胀腔体积变化：

$$V = SA(1 - \sin(\theta t - \beta)) + Sy_1 \quad (9)$$

式中： y_1 是蓄冷器振动覆盖不到的膨胀腔余隙。

在斯特林制冷循环中，膨胀腔制冷量为：

$$Q = \int P dV \quad (10)$$

把式(3)和式(10)带入式(1)，即可得到膨胀机在单位时间内的制冷量。

$$\begin{aligned} Q &= \oint P_c dV \\ &= \oint (P_{c0} \sin(\theta t - \alpha) + P_{cl}) d(SA(1 - \sin(\theta t - \beta)) + Sy_1) \end{aligned} \quad (11)$$

经整理之后最后可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{1}{2} P_{c0} S A \theta \sin(\alpha - \beta) \\ \alpha - \beta = \alpha + \arctan \frac{P_{c0} \sin \alpha}{(1-\eta)P_{h0} - P_{c0} \cos \alpha} - \arctan \frac{2\xi\gamma}{1-\gamma^2} \end{array} \right. \quad (12)$$

从上式可知，膨胀机的制冷能力与膨胀腔的压力波幅值 P_{c0} 、冷指截面积 S 、振子振幅 A 以及位移压力相位角有关。相角由三项组成，第一项是 P_{c0} 落后 P_{h0} 的相位；第二项是作用在蓄冷器上的压力差超前 P_{h0} 的相位，第三项是由于阻尼造成蓄冷器

位移落后激励力的相位。最理想的状态是使得 $\alpha - \beta$ 等于 90° ，此时膨胀腔制冷能力最大。

3 实验分析

3.1 实验方法介绍

本实验设计了直连型和阶梯轴两种结构膨胀机振子。其中阶梯杆面积比 η 分别为0.09、0.16、0.25、0.36、0.49共5种。试验采用同一压缩机驱动不同膨胀机，各膨胀机采用同一规格蓄冷器（蓄冷器几何尺寸、材料、网片均相同）。试验系统如图3所示：使用变频电源为制冷机提供驱动力；膨胀机外接动态真空，并在冷端使用测温二极管测量制冷温度，使用热负载以测量制冷量；在分置管外接压力传感器测量热腔压力，在膨胀机底部通过应变片或激光行程测量仪测量振子位移，压力和位移信号输入示波器以读取相位关系。主要实验参数有制冷机输入电压、电流、工作频率，制冷温度与制冷量，热腔压力波 P_h 与振子位移、以及两者的相角 β 。

阶梯轴结构采用板弹簧支撑，在弹簧上粘贴应变片后，可测出振子位移^[7]；直连结构采用螺圈弹簧，不能通过应变片测量振子位移，因此在膨胀机热端开了一玻璃观察窗，采用激光行程测量仪测量振子位移，但该方法测量的振子位移不准确，试验中仅用于测量相位关系。

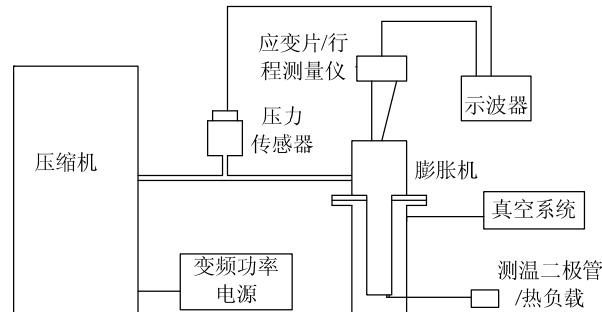


图3 试验平台示意

Fig.3 Sketch of the experiment platform

3.2 实验结果及分析

3.2.1 阶梯轴面积比试验

相同1 bar 压力波幅值 P_{h0} 下，对不同面积阶梯轴进行实验。使用配重平衡不同阶梯轴振子重量差异，保证不同阶梯轴振子的蓄冷器部分、质量、 k 值均相同。所得结果如图4所示，随面积比 η 增加，振子位移幅值 A 增加，相角 β 减小。趋势与前述式8分析相同 β 是 η 的减函数，在大多数情况（ η 不是非常小）下， A 是 η 的增函数。

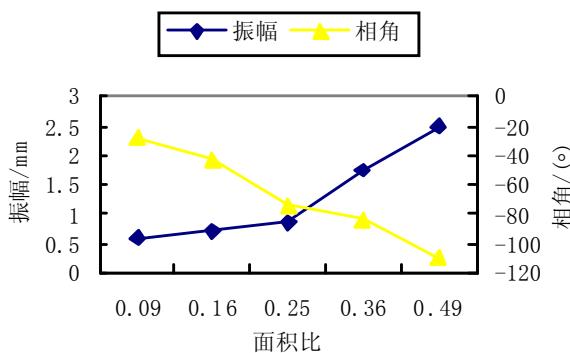


图4 不同面积比振幅相角

Fig.4 The phase angle and amplitude by various area rate

为了验证面积比与振子振幅相角关系,选择了固定的 P_{h0} 值,但制冷机实际运行时,不易调节压力波幅值,而是通过输入电压、频率等对制冷机进行控制,确定最优面积比还得考虑制冷机整机性能。

3.2.2 不同结构整机性能对比

在保证压缩机输入功率不大于 150 W、输入电流不大于 8 A 状态下,对直连结构及阶梯轴结构制冷机进行试验,得到的制冷机状态及性能如表 1 所示。阶梯轴结构制冷机仅轴面积变化,其他参数不变,如使用同一压缩机,相同蓄冷器参数、弹簧、工质压力和工作频率;直连结构与阶梯轴蓄冷器参数相同、工作频率一致,通过微调工质压力及弹簧 k 值,使得性能最佳。

从表 1 中可以看到,随 η 增加,驱动电流增加,为限流保护电机,驱动电压相应降低,输入功率减小; $\eta=0.09$ 时阶梯轴结构与直连结构制冷性能相近,但随 η 增加,制冷机性能降低,甚至不能达到预定制冷温度;随 η 增加,压力波幅值降低,相角增加,而振子振幅有一个从降低到增加过程。

考虑制冷量公式(12), $Q = \frac{1}{2} P_{c0} S A \theta \sin(\alpha - \beta)$,

性能降低的一个重要原因是压力波幅值的改变。制冷机的压缩机与膨胀机需有良好匹配,随面积比增加,压缩机与膨胀机匹配变差,直观表现为压缩机驱动电流增加。电流增加限制了电压的提高,使得

工作电压降低、于是实际扫气容积减小压力波幅值降低即压比降低,制冷机性能低下。在实验中,对 $\eta=0.49$ 阶梯轴,调整 k 值和工作频率,其制冷温度也未能达到 80 K。

通过实验可知,在实际研发中,除考虑 η 对振幅及相角影响外,还必须考虑对压力波幅值的影响。本组试验中性能最好的阶梯轴结构为 $\eta=0.09$ 阶梯杆,调整后性能还有望进一步提高。

3.2.3 阶梯轴频率适应性

以 $\eta=0.09$ 阶梯杆的阶梯轴结构为例进行试验,在给定 15 V 驱动电压下,制冷机不同工作频率性能如图 5(a)、5(b)所示。图中可以看出,在 $\beta < 0$ 时,随工作频率增加,制冷机压力波幅值、振幅及相角均增加,但制冷机性能基本不变,制冷机具有宽频工作适应性。当频率继续增加, $\beta > 0^\circ$ 后,冷头温度急速上升,回温速度快于制冷机停机状态,即制冷机转为制热。该现象亦符合式(12)讨论,即初始时随频率增加,压力幅值 P_{h0} 和振幅 A 增加, $\sin(\alpha - \beta)$ 减小,效应相互抵消,制冷量基本不变;但 $\beta > 0^\circ$ 并继续增大, $\sin(\alpha - \beta)$ 为负,制冷量为负值,制冷机开始制热。

4 总结

本文通过对阶梯轴与直连型,不同结构振子的运动分析与实验研究,得到以下结论:

1) 阶梯轴面积比 η 会影响振子振幅与振子与压力波相角,通常情况随面积比加大,振幅增加、相角减小。

2) 实际研发中,面积比影响膨胀机与压缩机的动力匹配,同等输入功率下 η 不同压比变化很大,因此设计膨胀机阶梯轴需在压比、振幅、相角各方面进行平衡。

3) 固定驱动电压下,随工作频率增加,一定范围内振子相角增加振幅加大,制冷量变化不大,因此制冷机表现为有较宽的工作频率适应性。

表 1 不同面积比阶梯轴性能表

Table 1 The performance by various area rate

面积比	0(直连)	0.09	0.16	0.25	0.36	0.49
驱动电压/V	23	22	22	20	18	18
驱动电流/A	6.5	6.9	6.8	7.3	8	8
制冷温度/K	60	60	60	60	85	103
制冷量/W	2.4	2.3	1.3	0.2	--	--
压力幅值 P_{h0}/bar	3.1	2.7	2.3	2.0	1.2	0.9
振子振幅/mm	未测量	1.3	1.1	1.4	1.9	2.3
相角/(°)	-140	-27	-31	-76	-83	-103

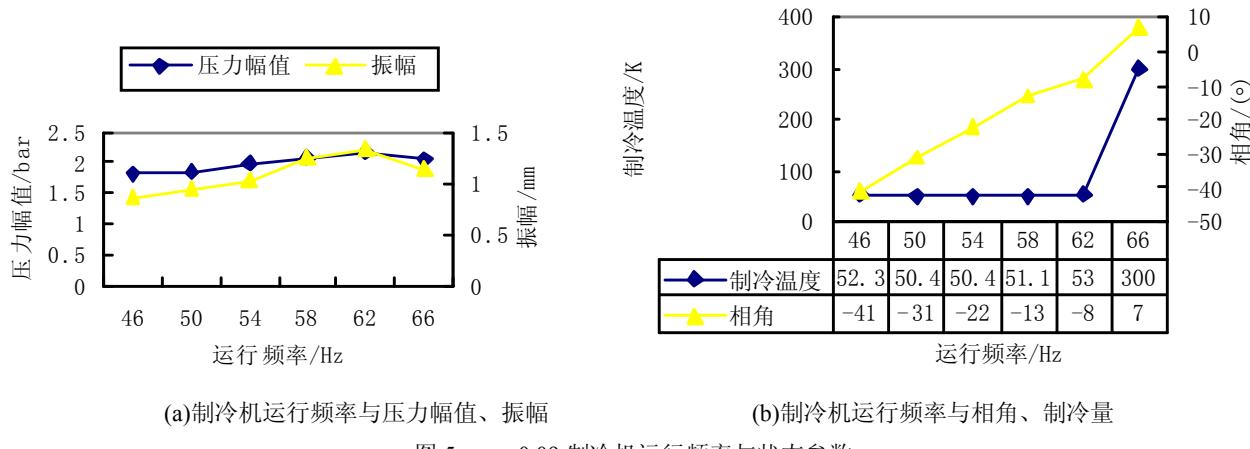


Fig.5 The operating frequency and status parameters where $\eta=0.09$

下一步的研究准备试验更小面积阶梯轴，了解阶梯轴如何影响压缩机与膨胀机的匹配。

参考文献：

- [1] 胡白楠, 陈晓屏, 夏明. 微型斯特林制冷机的进展[J]. 红外技术, 2006, **26**(12): 730-733.
- [2] 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 夏明. 动磁式线性斯特林制冷机的制冷性能和运动特性[D]. 昆明: 昆明物理研究所, 2010.

- [4] 张存泉. 分置式斯特林制冷机气动特性与调相机制的理论研究与实验验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [5] Tonny Benschop, Jeroen Mullié, Peter Bruins, et al. Development of a 6 W high reliability cryogenic cooler at Thales[C]//Proc. of SPIE on Cryogenics, 2003, **4820**: 33-42.
- [6] 谢官模. 振动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] 陈曦, 武卫东, 张华, 等. 基于应变片的自由活塞斯特林制冷机位移测试研究[J]. 低温与超导, 2007(5): 384-386.

(上接第 67 页)

- Li J, Mao J T. Simulation about influence of ice property changes on cirrus radiative properties. Meteorological Monthly, 2006, **32**(2): 9-13.
- [3] 赵燕杰, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波光学特性[J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(3): 169-174.
- Zhao Y J, Wei H L, Chen X H, et al. Scattering properties of cirrus clouds in the shortwave spectral region. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, **2**(3): 169-174.
- [4] Liou K N. A numerical experiment on Chandrasekhar's discrete-ordinates method for radiative transfer: Application to cloudy and hazy atmospheres. J. Atmos. Sci, 1973, **30**: 1303-1326.
- [5] Berk A, Bernstein L S. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, **65**(3): 367-375.
- [6] Hu Y X, Wielicki B, Lin B, et al. δ -fit:a fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value

- decomposition least-squares fitting[J]. J Quant Spectr Radiative Transfer, 2000, **65**: 681-690.
- [7] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. A numerically stable algorithm for discrete -ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. Appl Opt, 1988, **27**: 2502-2509.
- [8] Spinhirne J D, Hart W D, Hlavka D L. Cirrus infrared parameters and shortwave reflectance relations from observations[J]. J. Atmos. Sci., 1996, **53**(10): 1438-1458.
- [9] 成志铎, 任登凤, 韩玉阁. 基于降维思想的红外辐射特性快速算法研究[J]. 红外技术, 2011, **33**(11): 666-669.
- Chen Zhi duo, Rend eng feng, Han Yu ge. Research on fast algorithm for infrared radiation characteristics based on dimension reduction method[J]. Infrared Technology, 2011, **33**(11): 666-669.