

〈综述与评论〉

声功回收型脉管的研究进展

赵兴英¹, 黄伟^{1,2}, 陈军^{1,2}, 罗云^{1,2}, 叶文帆^{1,2}, 孙皓¹, 毕翔¹, 李晓君³

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 红外探测全国重点实验室, 云南 昆明 650223;
3. 空军成都局驻昆明地区军代室, 云南 昆明 650223)

摘要: 由于具有低振动、长寿命、高可靠性等优点, 脉管制冷机在高温超导和星载红外器件等领域的应用具有明显优势, 近年来也逐渐成为研究的热点领域之一。然而, 传统调相方式的脉管制冷机因热端声功以热量形式耗散, 本征制冷效率较斯特林制冷机低。采用声功回收技术可以显著提高制冷效率, 降低重量, 对于高温区大冷量制冷机的性能提升更为显著。本文通过对国内外脉管制冷机声功回收方式的研究进展进行分析, 展望了斯特林型脉管制冷机声功回收的应用前景和发展趋势。最后阐述了在昆明物理研究所应用的声功回收型脉管制冷机。

关键词: 脉管; 声功回收; 应用前景

中图分类号: TB651 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2025)05-0539-07

Research Progress of Pulse Tube With Acoustic Power Recovery

ZHAO Xingying¹, HUANG Wei^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, LUO Yun^{1,2}, YE Wenfan^{1,2},
SUN Hao¹, BI Xiang¹, LI Xiaojun³

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 2. National Key Laboratory of Infrared Detection, Kunming 650223, China; 3. Military Representative Office of the Chengdu Air Force Bureau in Kunming Region, Kunming 650223, China)

Abstract: Owing to its advantages of low vibration, long lifespan, and high reliability, the pulse tube refrigerator has demonstrated significant potential in applications such as high-temperature superconducting systems and satellite-borne infrared devices. As a result, it has become one of the prominent research areas in recent years. However, the inherent refrigeration efficiency of a pulse tube refrigerator using traditional phase modulation methods is generally lower than that of a Stirling refrigerator. This is primarily because the acoustic power at the hot end is dissipated as heat. Recovering this acoustic power can enhance refrigeration efficiency and reduce overall system weight, which is especially beneficial for refrigerators with high cooling capacities operating in high-temperature environments. This paper reviews the current state of research on acoustic power recovery methods for pulse tube refrigerators, both domestically and internationally, and explores their application prospects and development trends. Finally, a pulse tube refrigerator incorporating acoustic power recovery suitable for use in a KIP unit is presented.

Keywords: pulse tube, acoustic power recovery, application prospect

0 引言

脉管制冷机最早是由美国的 Gifford 教授和 Longsworth 教授发现并提出的。Gifford 教授在实验中发现, 与压缩机相连的铅管在其封闭端会变热, 用一个回热器将铅管与压缩机相连接, 铅管的一端制冷而另一端变热, 从而形成了基本型脉管制冷机^[1-3]。脉管

制冷机由压缩机驱动, 由于其冷端运动部件的消除而避免了低温下的滑动密封、机械磨损等问题, 有望真正成为低成本、低振动、运行稳定可靠的长寿命低温制冷机^[4]。特别是随着小孔气库、双向进气、惯性管等调相机构的提出和成功运用, 脉管制冷机制冷温度不断降低, 制冷量和制冷效率也大幅提升, 接近甚至在某些工况下超过传统的回热式低温制冷机(如 G-M

收稿日期: 2023-03-29; 修订日期: 2023-09-20.
作者简介: 赵兴英(1994-), 女, 重庆人, 工程师, 主要研究方向: 低温工程-脉管制冷机。E-mail: 18351898376@163.com。

制冷机、斯特林制冷机等),已在超导器件和红外设备的冷却,以及气体液化等方面得到广泛应用。

然而传统的脉管制冷机需要在脉管热端附加额外的调相装置,使得系统结构相比于斯特林制冷机更加复杂;此外,其脉管热端声功无一例外地需在调相装置内以热量的形式耗散掉,这也直接导致了其制冷系统的理想效率远低于卡诺效率^[5]。对于小冷量需求的场合,回收脉管热端声功的意义并不十分显著,但是对于大冷量的应用场合,耗散的声功量级足够大,回收这部分耗散声功对于提高整机制冷效率不可忽视^[6]。

本文通过对国内外脉管制冷机声功回收方式的研究进展进行分析,展望了斯特林型脉管制冷机声功回收的应用前景和发展趋势,并总结了本单位研发的脉管制冷机技术特点,结合实际工程应用情况,提出了结合本单位脉管制冷机的声功回收应用方案。

1 声功回收型脉管制冷机的研究现状

随着制冷量和应用温区的提升,脉管制冷机脉管热端耗散的声功越多,相对来说,回收声功也更加容易。当冷端温度为 80K 时,理论上 1/4 的声功可以回收,这是一个相对可观的能量^[7]。而且随着温区不断提升,声功回收的必要性就越大。根据有无运动部件,声功回收方式可以分为两种:有运动部件和无运动部件。有运动部件型主要是引入了运动部件,通过运动部件将声功和机械振动相互转换来回收声功;无运动部件型主要是引入了传输管道,通过管道将声功传输到特定位置,然后再利用以回收声功^[8]。

1.1 有运动部件的声功回收型脉管制冷机

1.1.1 活塞型脉管制冷机

活塞型脉管制冷机最早是由 Matsubara 教授提出的^[9-10],其结构如图 1 所示。在传统脉管制冷机的脉管热端连接一个驱动活塞,其工作原理是将斯特林型脉管制冷机中冷端的膨胀活塞移到室温区,增强了小孔气库型结构的调相能力,并通过主动调相的方式实现了更大范围的相位调节^[4],最低制冷温度较小孔气库型脉管制冷机下降了 5 K。该驱动活塞的存在可回收声功,消除小孔不可逆损失,尽管它是一个机械运动部件,但与传统斯特林制冷机相比,该运动部件位于室温端,因而制冷机可靠性依然较高。

1992 年,日本学者 Ishizaki Y.和 Ishizaki E.在 Matsubara 教授的研究基础上深入研究了双活塞型脉管制冷机,他们研制的脉管制冷机制冷量在 80 K 达到了 45 W,制冷效率达到了 0.035。在此基础上,1992 年,日本电器技术公司研发的同类型的双活塞型脉管

制冷机,其最低无负载制冷温度达到了 23.5K^[11],是当时有报道的制冷温度最低的单级脉管制冷机。

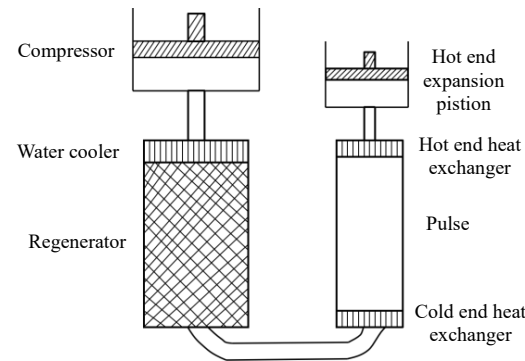


图 1 带热端膨胀活塞的脉管制冷机
Fig.1 Pulse tube refrigerator with hot end expansion piston

2010 年,朱绍伟等在上述理论的基础上提出了热端气动型脉管制冷机^[12],如图 2 所示,该制冷机由三部分组成:压缩机单元、无运动活塞的脉管膨胀机单元、排除器单元(用于回收声功)。该结构有两点优势:高效紧凑、冷端无运动部件,仅存在室温下的运动部件。这种结构通过在脉管热端加装排除器使得调相更加充分,减小了回热器损失,又可回收膨胀功,提高了整机效率,其相对卡诺效率达 58%。

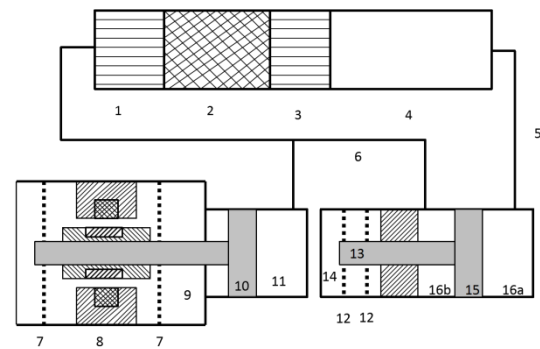


图 2 热端气动型斯特林脉管制冷机结构^[12]
Fig.2 The structure of the hot-end pneumatic-type pulse tube refrigerator^[12]

Note: 1. Post-stage air cooler; 2. Regenerator; 3. Adsorption heat exchanger; 4. Pulse; 5. Connecting pipe; 6. Connecting pipe; 7. Compressor spring; 8. Linear motor; 9. Back pressure chamber; 10. Piston; 11.Compression chamber; 12. Excluder spring; 13. Compression rod; 14. Relief chamber; 15. Ejector; 16a. Expansion chamber; 16b. Back pressure chamber

2013 年,中科院的胡剑英、罗二仓等人提出了多缸脉管制冷机的结构^[13-14]。此结构将 3 个(甚至更多个)热端活塞型脉管制冷机首尾相连,将上一级膨胀机回收的声功传输至下一级压缩机的预压腔内,再由预压腔将声功传输至压缩腔,以此实现采用多级制冷

机相连来回收声功的目的。对此种结构进行数值模拟,胡剑英等人发现在制冷量为 1106 W 时,主制冷机传输的声功为 7184 W,次制冷机处回收了 1620 W 的声功,三级制冷机互连结构的回收效率高达 22.55%,相对卡诺效率达 35%。他们通过数值模拟计算证明此种声功回收结构获得了比传统斯特林型脉管制冷机更大的声场,并且在大功率应用场合,其结构比较紧凑,能大幅提升脉管制冷机的制冷性能。

2014 年,朱绍伟提出了一种新型的阶梯活塞型脉管制冷机结构^[15],如图 3 所示。在脉管热端和压缩机压缩腔之间放置惯性管和缓冲器。到达脉管热端的膨胀功,一部分在惯性元件中以废热的形式耗散,余下的膨胀功经惯性管和缓冲器的传输后到达压缩腔,并被压缩腔回收利用,从而提高制冷效率。朱绍伟对阶梯活塞型脉管制冷机进行了数值模拟计算,在只考虑惯性管中的传热和摩擦损失,而忽略机械损失、导热损失、电动机损耗、漏气损失和辐射损失时,阶梯活塞型脉管制冷机的相对卡诺效率为 43.4% (制冷温度为 77 K),高于惯性管调相型脉管制冷机在相同工况下的相对卡诺效率。此外,制冷温度越高,压缩腔内回收的膨胀功越多,如在制冷温度为 110 K 温区时,相对卡诺效率最高可达 44.6%。

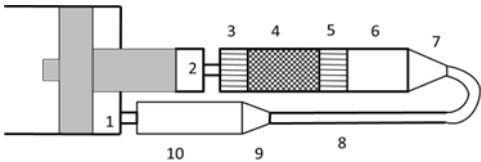


图3 阶梯活塞型脉管制冷机结构

Fig.3 The structure of the stepped piston pulse tube refrigerator

2018 年,同济大学的 Lin Y. Z.等^[16]提出了一种新型的脉管制冷机调相方式——惯性管与推移活塞的结合,其结构如图 4 所示。Lin Y. Z.通过建立室温推移活塞(SP-PTR)脉管制冷机的数值模型,研究了脉管到膨胀腔之间的声功传输特性和惯性管调相特性。以制冷机运行频率和扫气容积比为自变量,研究了惯性管-推移活塞结合的声功回收结构的原理、回收效率和相位调节模式。其数值模拟结果显示,当频率为 82 Hz、充气压力为 3 MPa、扫气容积比为 0.6 时,这种声功回收结构的回收效率达 60.3%,并且膨胀机端的压力波和质量流有较好的相位关系。

2020 年, Deng W. F.等人研制了一种能在液化天然气温度(110 K)下回收声功的脉管制冷机^[17],如图 5 所示。该制冷机主要由气缸、阶梯移相器、板弹簧和减振器等组成。Deng W. F.对声功回收器中的阶梯移相器进行了重新设计和优化,分析了声功回收器中

阶梯移相器和质量弹簧组件对制冷机制冷性能和制冷效率的影响。利用设计良好的声功回收器,在 110 K 下对典型样机进行了实验研究,验证了模拟结果,实测的相对卡诺效率大于 21%,是截止 2023 年报道的在 110 K 左右工作的紧凑型轻量级声功回收脉管制冷机的最高效率。

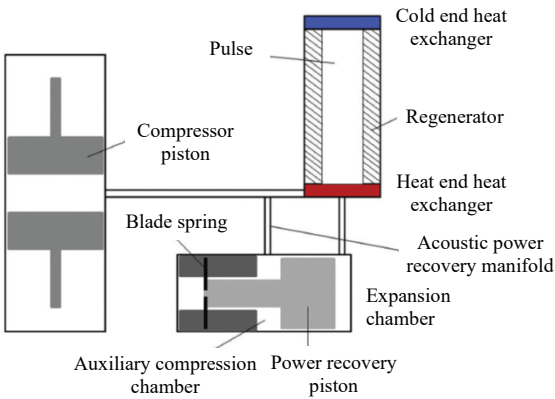


图4 惯性管+推移活塞型声功回收脉管制冷机

Fig.4 Acoustic power recovery pulse tube refrigerator with reciprocating piston and inertance tube

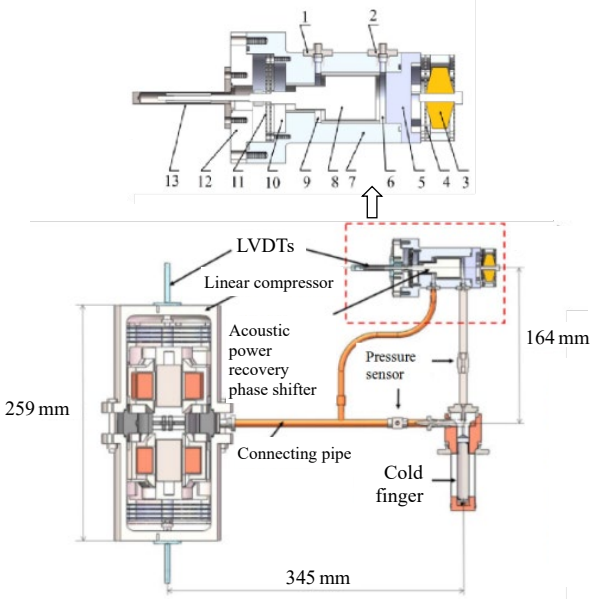


图5 带声功回收移相器的脉管制冷机结构

Fig.5 The structure of pulse tube refrigerator with acoustic power recovery phase shifter

Note: 1. Air inlet; 2. Blow vent; 3. Counterbalance; 4. Blade spring; 5. Front cover; 6. Expansion chamber; 7. Cylinder; 8. Treadle phase shifter; 9. The second compression chamber; 10. Buffer room; 11. Spring; 12. Back cover; 13. Linear variable differential transformer

2018 年,上海理工大学陈曦研制了一款一拖二功回收型脉管制冷机^[18],用两个对称布置的功回收活塞回收声功,该声功回收结构效率高、可靠性高,且因

对称布置而振动较低,已获得试验验证。2022 年,上海技术物理研究所的蒋珍华研制了一款主动活塞调相功回收脉管制冷机^[19],该款制冷机将压缩机和膨胀机集成于一体,通过主动活塞调相回收声功,结构紧凑、效率高,且已获得试验验证。

1.1.2 质量弹簧阻尼型脉管制冷机

2012 年,韩国学者 Taekyung 等人报道了一种结构紧凑的声功回收调相机构^[20],如图 6 所示。此类声功回收调相机构称为质量弹簧阻尼系统,主要由永磁体、弹簧、阻尼器、支撑架、线圈、波纹管等组成。通过弹簧和阻尼器将声功转化为机械功,再通过磁体活塞将机械功转化为电功,从而实现声功的回收。并通过以上的转换过程来调节相位。数值模拟结果表明,质量弹簧阻尼型调相结构与惯性管+气库型调相结构的调相能力相近,但由于采用了波纹管来代替膨胀活塞,不需要考虑气缸与活塞间的间隙密封等问题,因此结构比较紧凑,且可以将一部分声功回收至直线发电机中,提高了制冷机整机的制冷效率。数值模拟结果显示,在压缩机输出相同 PV 功时,该调相机构能比惯性管+气库型脉管制冷机多获得 0.3 W@50 K 的制冷量,并且可以有效回收 37W 的声功,整机制冷效率提高了 15.6%。

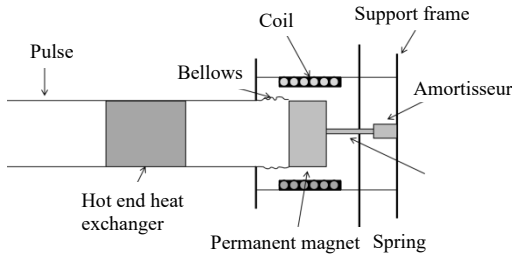


图 6 紧凑型声功回收调相机构

Fig.6 Compact acoustic power recovery phase-shifting institution

2016 年,王凯等提出了一种新的声功回收方式,带质量-弹簧能量反馈系统,其结构如图 7 所示^[21]。该制冷机为 U 型脉管制冷机,采用质量-弹簧组成的排除器将脉管热端和压缩腔连接起来,可将脉管热端回收的声功传输至压缩机的压缩腔内。模拟结果表明,此种结构的调相能力高于惯性管+气库型结构,且其制冷性能有明显提升,制冷效率在 77K 可达到 0.13~0.14。

1.2 无运动部件的声功回收型脉管制冷机

有运动部件的声功回收脉管制冷机是在脉管热端加入了额外的运动机械部件,虽然回收声功效率高,但因运动部件的加入而降低了制冷机的可靠性和寿命。除了此类声功回收结构外,还有一种不用加入额外运动部件来回收声功的结构,此类结构称为无运动部件声功回收型脉管制冷机^[8]。其在脉管制冷机中

的脉管热端添加管子等无运动部件调相机构,通过气体的惯性作用来调节相位(即不主动可控的调节脉管制冷机的相位),从而达到提高整机效率的目的^[4]。无运动部件的声功回收型脉管制冷机主要有以下几种。

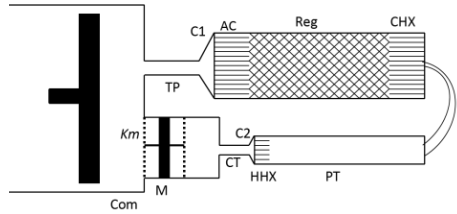


图 7 带质量-弹簧能量反馈的声功回收脉管制冷机

Fig.7 Acoustic power recovery pulse tube refrigerator with quality and spring energy feedback

Note: Com: Compressor; TP: Transport tubes; C1: Conical mouthpiece 1; AC: After-end cooler; Reg: refrigerator; CHX: Cold end heat exchanger; PT: Pulse; HHX: Hot end heat exchanger; C2: Conical mouthpiece 2; CT: Connecting tubes

1.2.1 管道传输声功回收型单级脉管制冷机

1999 年,美国学者 Swift 等人^[22]采用热声理论,系统研究了管道传输型声功回收方案,并提出了两种采用管道传输来回收声功的新结构。如图 8 所示,一种为“反馈传输管型”,另一种为“集中放大型”。第一种结构如图(a)所示,用一根传输管将脉管热端与压缩机背压腔直接相连,从而回收脉管热端的声功。Swift 运用热声理论计算证明了管道传输型声功回收结构即使存在传输管声功损耗,压缩机背压腔仍能回收部分声功。然而,因该结构由于脉管热端和压缩机背压腔为闭合环路,环路间存在直流现象,且相比于集中放大型声功回收结构,结构比较松散,因而 Swift 并未开展实验验证。

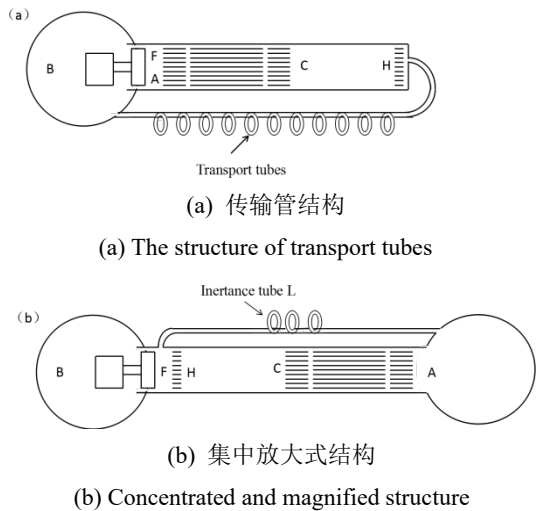


图 8 管道传输型脉管制冷机

Fig.8 Pulse tube refrigerator of pipeline transmission

图(b)为集中放大装置的脉管制冷机,为抑制脉管制冷机内部直流现象,Swift 在集中放大装置的基础上,在脉管热端加装了阻性元件和弹性气库^[22]。通过这种结构,将脉管热端回收到的声功直接传输到压缩机的压缩腔内,再通过气库+惯性管的方式将声功传输到冷端散热器侧,从而驱动脉管制冷机。通过 Swift 教授的理论计算发现,这种结构可调节冷端散热器和压缩机出口处的压力幅值差。实验结果表明,改进后的集中放大式脉管制冷机在 -55°C 时,制冷量为 $70\text{ W@}290\text{ W@}-55^{\circ}\text{C}$,制冷效率为 0.29,相对卡诺效率为 9%。虽然该结果可以证明集中放大式结构回收声功的有效性和可行性,但其制冷效率低于后来发展起来的小孔气库型调相结构,因而未获得广泛应用。

1.2.2 管道传输声功回收型多级脉管制冷机

2002 年,朱绍伟和 Kawano S.等人基于双向进气调相结构,提出了一种新的声功回收方式——双向进气直连型^[23],如图 9 所示。该结构将两级脉管制冷机直接相连,将第一级脉管热端的膨胀功传输到第二级回热器的热端,作为第二级回热器的压缩功,从而提升第二级膨胀机的制冷量。并在此结构的基础上,引入了双向进气、多缸压缩机等结构,增加了系统的复杂性,但也增强了系统的调相能力,从而进一步提升了整机的制冷性能。

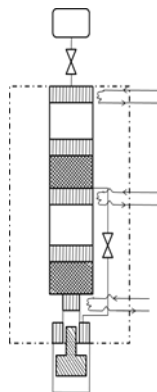


图9 双向进气直连型声功回收型脉管制冷机

Fig.9 Acoustic power recovery pulse tube refrigerator with bidirectional intake direct connection

2011 年,Swift 等人提出一种新的声功回收方式—— $1/4$ 波长声功回收型^[24],将两级制冷机的首尾用一根长度约为工质声波波长 $1/4$ 的脉管连接起来,此种结构可将第一级制冷机蓄冷器冷端的声功回收至第二级蓄冷器热端,用于驱动第二级制冷机工作,并改变质量流与压力波之间的相位差。

基于上述结构,Swift 使用 DeltaE 软件对一台制冷量达千瓦级的制冷机进行了数值模拟,结果表明^[24],在输入功率为 10 kW 时, $1/4$ 波长声功回收结构第一

级脉管制冷机制冷量为 $1.78\text{ kW@}110\text{ K}$,第二级制冷机制冷量为 0.45 kW ,制冷效率达到了 0.223,相对卡诺效率高达 39%。

2013 年,朱佳凯等人^[6]提出了一种级联型声功回收脉管制冷机,其由主辅两级脉管制冷机组成,主辅级之间用一根传输管相连,利用传输管中气体的惯性效应来调节压力波相位,使得从主级制冷机传输而来的膨胀功能驱动辅级制冷机,从而回收部分声功,将该制冷机的制冷效率提高近 30%,制冷量达 $164\text{ W@}233\text{ K}$ 。

2015 年,中国科学院理化技术研究所罗二仓等人开展了用热声发动机驱动脉管制冷机的研究^[25-26]。其工作原理为去掉了脉管制冷机热端相连的运动部件,用热声发动机代替线性或 G-M 压缩机来驱动脉管膨胀机。罗二仓等人提出了一种三级环路热声驱动型脉管制冷机,其结构如图 10 所示。数值模拟结果表明,在充气压力为 4 MPa 时,该款制冷机可获得 $7.75\text{ W@}77\text{ K}$ 的制冷量,相对卡诺效率达到了 11.78%。

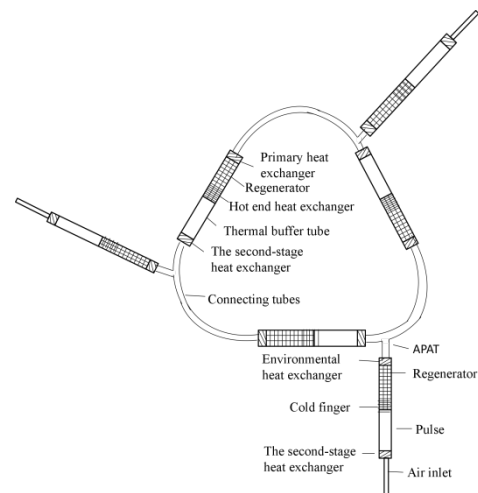


图 10 300 Hz 三级环路热声驱动脉管制冷机

Fig.10 Pulse tube refrigerator driven by a 300 Hz three-stage traveling-wave thermo-acoustic heat engine

2 声功回收型脉管制冷机的应用前景和发展趋势

目前,在脉管制冷机方面,实际应用的声功回收系统较少,主要原因在于其增加了制冷机系统的复杂性,且在制冷量较小的情况下,声功回收的意义不明显;在制冷量较大的场合,采用声功回收后,制冷机的效率提升显著。从以上调研可以看出,文献报道的声功回收型脉管制冷机大多采用数值模拟方法获得,通过实验验证并实际应用的较少。因此,在大冷量要求下,后续研究人员可采用结构简单且 COP (Coefficient of Performance) 较高的回收方式,并在数值模拟的基础上进行实验验证。

相对于无运动部件和质量弹簧阻尼系统这两种声功回收方式,活塞型脉管制冷机声功回收效率较高,且已有实验验证。因此,后续可开展关于活塞型脉管制冷机的实验研究。

3 应用于昆明物理研究所的声功回收型脉管制冷机

制冷机主要用于为探测器杜瓦组件提供稳定的低温工作环境。为了使红外探测器组件适用于更多的工作场景,通常要求红外探测器在满足性能要求的同时,具备体积小、可靠性高、寿命长、效率高的特点。而制冷机的体积、重量、寿命几乎决定了红外探测器组件的体积、重量和寿命。因此在设计脉管制冷机的声功回收结构时,应从体积、重量、寿命和效率几个方面综合考虑和选择。

现有的脉管制冷机主要为单级同轴型脉管制冷机,其振动小、寿命长、可靠性高、结构紧凑,制冷性能指标为 $10\text{ W}@80\text{ K}@250\text{ W}$ 。其制冷量大,采用声功回收结构来回收声功的作用明显。因此,根据实际应用场景,可选用结构简单、回收效率高、具有微调相作用且不大幅增加制冷机重量的声功回收方式来回收声功。

脉管制冷机多采用惯性管+气库的方式进行调相,而室温推移活塞型脉管制冷机具有声功回收效率高、结构简单、制冷温度低且无直流效应的优点,已通过实验验证,且其脉管制冷机模型和运行参数与昆明物理研究所现有的脉管制冷机相近,因此可采用室温推移活塞+惯性管的方式改进结构,回收声功。同时,参考声功回收移相器的设计优化室温推移活塞,以提升脉管制冷机的声功回收效率。

4 结论

本文通过对国内外脉管制冷机声功回收方式的研究进展进行分析,发现现有的声功回收方式普遍欠缺实验验证和实际应用。相对于无运动部件和质量弹簧阻尼这两种声功回收方式而言,活塞型声功回收方式的效率较高,且有一定的实验验证。因此,后续研究人员可开展关于活塞型脉管制冷机的进一步实验研究。结合本单位已有的脉管制冷机,其制冷量大,回收脉管热端声功制冷效率提升显著,因此提出采用室温推移活塞+惯性管的声功回收方案对脉管制冷机进行优化。

参考文献:

[1] Gifford W E, Longworth R C. Pulse tube refrigeration[J]. *Journal of*

Engineering for Industry, 1964, **86**: 264-268.

- [2] Gifford W E, Longworth R C. Pulse tube refrigeration progress[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1964, **10**(B): 69-79.
- [3] Gifford W E, Kyanka G H. Reversible pulse tube refrigeration[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1966, **12**: 619-630.
- [4] 吴镁. 声功回收级联型脉管制冷机研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WU Mei. Study on a Cascade Pulse Tube Cryocooler with Work Recovery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 王龙一, 刘东立, 王博, 等. 基于脉管内调相的声功回收型脉管制冷机[P]. 中国: 201210587580. X, 2013.
WANG Longyi, LIU Dongli, WANG Bo, et al. A Acoustic Power Recovery Pulse Tube Refrigerator Based on the Phase Modulation in the Tube Interior[P]. China: 201210587580. X, 2013.
- [6] 朱佳凯, 宋豫京, 王龙一, 等. 一种声功回收型级联脉管制冷机[C]//第十一届全国低温工程大会论文集, 2013: 342-347.
ZHU Jiakai, SONG Yujing, WANG Longyi, et al. A cascade pulse tube with work recovery[C]//*Proceedings of the 11th National Cryogenic Engineering Conference*, 2013: 342-347.
- [7] 姜晓. 斯特林型脉管制冷机声功匹配机理与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
JIANG Xiao. Study on Acoustic Power Match in a Stirling Pulse Tube Cryocooler[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2017.
- [8] 王龙一. 脉管制冷声-力-电匹配及其逼近卡诺效率的方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
WANG Longyi. A Coustic-Mechanical-Electrical Coupling and an Approach to Carnot Efficiency of Pulse Tube Refrigeration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [9] Matsubara Y, Miyake A. A Iternative methods of the orifice pulse tube refrigerator[C]//*International Cryocooler Conference* 05, 1988: 127-135.
- [10] Matsubara Y. Classification of pulse tube cryocoolers[C]//*International Cryogenic Engineering Conferenc*, 1988: 11-16.
- [11] Ishizaki Y, Ishizaki E. Experimental performance of modified pulse tube refrigerator below 80 K down to 23 K[C]//*Proceedings of 7th International Cryocooler Conference*, 1992: 140-145.
- [12] ZHU S, NOGAWA M. Pulse tube stirling machine with warm gas-driven displacer[J]. *Cryogenics*, 2010, **50**(5): 320-330.
- [13] 胡剑英, 罗二仓, 吴张华, 等. 多缸脉冲管制冷机的调相机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, **34**(2): 229-232.
HU Jianying, LUO Ercang, WU Zhanghua, et al. Research on phase modulation mechanisms in multi-cylinder pulse tube cryocoolers[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(2): 229-232.
- [14] HU J Y, LUO E C, ZHANG L M, et al. A double-acting thermoacoustic cryocooler for high temperature superconducting electric power grids[J]. *Applied Energy*, 2013, **112**: 1166-1170.
- [15] ZHU S. Step piston pulse tube refrigerator[J]. *Cryogenics*, 2014, **64**: 63-

- 69.
- [16] LIN Y Z, ZHU S W. Numerical investigation of the new phase shifter for pulse tube refrigerator-inertancetube combining with step-piston[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, **97**: 42-48.
- [17] DENG Weifeng, LIU Shaoshuai, CHEN Xi, et al. A work-recovery pulse tube refrigerator for natural gas liquefaction[J]. *Cryogenics*, 2020, **111**: 1-8.
- [18] 陈曦, 缪源, 杨易坤, 等. 一种电磁阀以及一拖二功回收型脉管制冷机[P]. 中国: CN 108869774 A, 2018-11-23.
- CHEN Xi, MIU Yuan, YANG Yikun, et al. An electromagnetic valve and a dual-piston active-buffer pulse tube cryocooler with work recovery[P]. China: CN 108869774 A, 2018-11-23.
- [19] 蒋珍华, 吴亦农, 黄政, 等. 一种柱弹簧支撑的主动活塞调相功回收一体式脉管制冷机[P]. 中国: CN 115289713 A, 2022-07-11.
- JIANG Zhenhua, WU Yilong, HUANG Zheng, et al. An integrated linear spring supported active-piston phase shifting and work recovery pulse tube cryocooler[P]. China: CN 115289713 A, 2022-07-11.
- [20] KI T, JEONG S. Design and analysis of compact work-recovery phase shifter for pulse tube refrigerator[J]. *Cryogenics*, 2012, **52**(2/3): 105-110.
- [21] WANG K, DUBEY S, CHOO F H, et al. Modelling of pulse tube refrigerators with inertance tube and mass-spring feedback mechanism[J]. *Applied Energy*, 2016, **171**: 172-183.
- [22] Swift G W, Gardner D L, Backhaus S. Acoustic recovery of lost power in pulse tube refrigerator[J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 1999, **105**(2): 711-724.
- [23] ZHU S, Kawano S, Nogawa M, et al. Pulse tube refrigerator 8,389, 819,2002.[P]. U.S. Patent.
- [24] Swift G W, Gardner D L, Backhaus S N. Quarter-wave pulse tube[J]. *Cryogenics*, 2011, **51**(10): 575-583.
- [25] XU J, YU G, ZHANG L, et al. Numerical investigation on a 300 Hz pulse tube cryocooler driven by a three-stage traveling-wave thermo-acoustic heat engine[J]. *Cryogenics*, 2015, **71**: 68-75.
- [26] XU J, HU J, ZHANG L, et al. Effect of coupling position on a looped three-stage thermo-acoustically-driven pulse tube cryocooler [J]. *Energy*, 2015, **93**: 994-998.