

整体式斯特林制冷机机械噪声分析与控制对策

刘湘德¹, 饶启超¹, 刘京生², 耿利红¹, 卢旭辰¹, 迟国春¹

(1. 中电科第十一研究所, 北京 100015; 2. 陆装驻北京地区第二军事代表室, 北京 100015)

摘要:应用于军事侦查领域的红外焦平面探测器制冷组件要求低机械噪声。为降低整体式斯特林制冷机的机械噪声,需要针对噪声产生的原因进行分析。在定位压缩弹簧设计不合理和轴承装配工艺不当导致制冷机机械噪声偏大后,通过优化设计和装配工艺,减少了制冷机在实际应用中的不利影响,制冷机机械噪声这一性能指标满足了用户的应用需求。

关键词:整体式斯特林制冷机;机械噪声;压缩弹簧;轴承;优化设计;装配工艺

中图分类号:TN216;TB651+.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.013

Analysis and control countermeasure of mechanical noise of integral Stirling cryocooler

LIU Xiang-de¹, RAO Qi-chao¹, LIU Jing-sheng², GENG Li-hong¹, LU Xu-chen¹, CHI Guo-chun¹

(1. The 11th Institute of CETC, Beijing 100015, China;

2. The Second Military Representative Office of Army Equipment Department in Beijing, Beijing 100015, China)

Abstract: The Stirling cryocooler component of infrared focal plane array detector used in military investigation requires low mechanical noise. In order to reduce the mechanical noise of the integral Stirling cryocooler, the causes of noise are studied. Results show that the unreasonable design of the compression spring and improper bearing assembly process are the main causes for the mechanical noise of the integral Stirling cryocooler. The adverse effects of the cryocooler in practical application caused by the mechanical noise can be reduced by optimizing the design and assembly process, the performance index of the mechanical noise of the integral Stirling cryocooler meets the application requirements of users.

Keywords: integral Stirling cryocooler; mechanical noise; compressing spring; bearing; optimizing design; assembly process

1 引言

斯特林制冷机是以高纯氦气为制冷工质,采用逆向斯特林循环原理工作的低温制冷机。斯特林循环原理于1816年,由苏格兰人O. R. Stirling提出,由两个等温过程和两个等容过程组成^[1](如图1)。自20世纪50年代至今,斯特林制冷机被广泛应用于车载、舰载、制导等军事领域中,其主要功能是为红外焦平面探测器提供稳定的低温工作环境(一般为77 K,或者更低),保证红外焦平面探测器工作时的成像质量。

斯特林制冷机一般由压缩单元和膨胀单元两个主要部分组成,按照压缩单元和膨胀单元的位置关系分类,制冷机可分为分置式和整体式两大类。相比于分置式制冷机,整体式斯特林制冷机具有结构紧凑体积小、重量轻、功耗低和效率高等优势^[2],被广泛应用于便携式手持红外侦查热像仪设备中。热像仪设备在实际应用中,要求静音、隐蔽,而整体式斯特林制冷机由于设计和工艺上的某些缺陷,势必会引起制冷机的振动,产生机械噪声,一定程度上影响了整体式斯特林制冷机的发展应用。

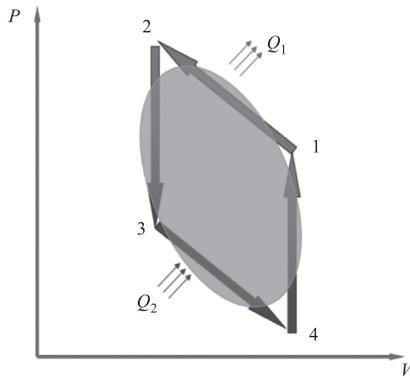


图 1 斯特林制冷机工作原理图

Fig. 1 Working principle of Stirling cryocooler

为降低整体式制冷机的机械噪声,国内外都进行了深入研究并取得了一定进展。罗高乔^[3]通过对曲柄连杆结构的改进优化以及活塞镀膜可靠性的研究,降低了制冷机的运动噪声和振动,并申请了专利。单伟根等人^[4]以制冷机的平衡块为研究对象,运用 CAE 软件通过设计优化,确定了最合适的平衡块质量。叶重等人^[5]利用计算机辅助设计分析了轴承选型及飞轮的设计对制冷机机械噪声的影响,并进行了优化设计。以上研究都在一定程度上降低了制冷机的机械噪声。

本文针对制冷量为 0.7 W/77 K 的一款旋转集成式斯特林制冷机(如图 2)为研究对象,从设计和工艺装配两方面对机械噪声产生的主要原因进行分析优化。

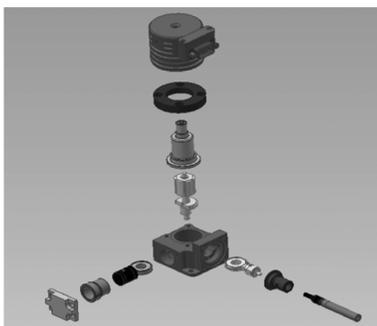


图 2 0.7 W 整体式斯特林制冷机基本结构

Fig. 2 Basic structure of 0.7 W integral rotary Stirling cryocooler

对比优化前后制冷机的机械噪声,降温至 77 K 工作前的机械噪声由优化前的 65.9 dB 降低至 54.6 dB,降温至 77 K 稳定闭环工作时的机械噪声由优化前的 54.4 dB 降低至 45.9 dB,满足了用户的使用性能指标要求,达到了预期目的。

2 制冷机机械噪声分析

2.1 整体式斯特林制冷机的结构特点

整体式斯特林制冷机的压缩单元和膨胀单元装

配在曲轴箱体体内,由偏心曲轴带动压缩单元和膨胀单元作往复运动。制冷机工作时,压缩活塞在气缸中不断压缩制冷工质,产生的压力波通过曲轴箱上的气孔传到膨胀单元中,并在回热器中完成热交换制冷过程。

2.2 影响制冷机机械噪声的主要因素

斯特林制冷机由多种精密机械零部件手工装配而成,产生的机械噪声由多种因素造成,主要因素如下:

2.2.1 压缩弹簧刚度失效

在斯特林制冷机中,压缩活塞组件是最重要的运动部件之一。它由压缩活塞、压缩弹簧、压缩活塞连杆、轴承、销钉等零件组成(如图 3)。

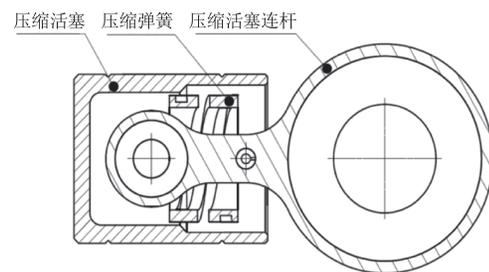


图 3 压缩活塞组件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of compression piston assembly

在斯特林制冷机工作时,由驱动电路驱使电机转子偏心轴结构旋转,从而带动压缩活塞组件和推移活塞组件做曲柄连杆机构的运动,压缩活塞连杆随偏心轴做往复摆动驱使压缩活塞沿活塞的轴向做往复运动。

在压缩活塞连杆往复运动的过程中,由于偏心机构和作用在曲柄连杆机构上的侧向力的存在,制冷机实际运行过程中,压缩活塞作直线运动的同时不可避免会有微小侧向运动,与压缩气缸套处于接触和摩擦状态。为降低侧向力对压缩活塞和压缩气缸套的磨损影响,作为关键零件的压缩弹簧依靠压缩变形产生的弹力对活塞运动轨迹起到持续调节的作用,使其能克服运动死点,顺畅地沿轴向做直线往复运动,减小活塞表面磨损。所以,压缩弹簧的刚度状态会直接影响整个制冷机的运转情况。如果刚度失效或明显降低,则会造成活塞的运动轨迹不可控,导致活塞与气缸套加速磨损和碰撞,产生异常的机械干摩擦噪声,进而造成制冷机卡死失效。

2.2.2 轴承润滑与装配不当

在整体式斯特林制冷机中,多处使用微型深沟

球轴承(如图4)和滚针轴承作为结构支撑和连接,其主要功能是承受运动部件的轴向和径向负载。轴承的润滑条件以及装配方式与制冷机机械噪声的大小密切相关,通过合理的工艺装配方法,可以减小轴承的负荷,降低制冷机的机械噪声。

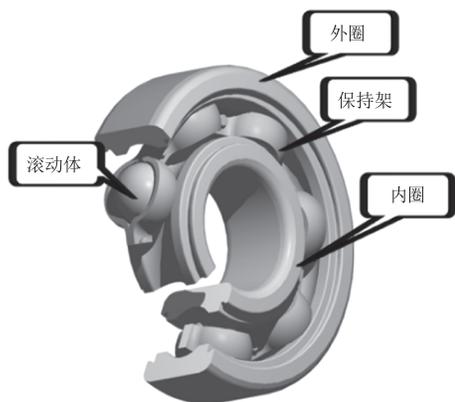


图4 深沟球轴承结构图

Fig. 4 Structural drawing of deep groove ball bearing

1) 轴承润滑

轴承润滑脂是在基础润滑油中加入稠化剂(皂基或非皂基)和添加剂得到的,其主要作用是:

①减少轴承滚珠/滚针与轴承滚道和保持架之间的摩擦力;

②冷却轴承表面温度;

③防止轴承滚动体、滚道和保持架生锈、腐蚀。

在正常润滑情况下,滚动体与轴承滚道之间被润滑脂隔开。一旦润滑脂因外界因素而性能下降,则会导致刚性体之间相互接触、碰撞,引起轴承表面粗糙度上升,最终使噪声增大。

2) 轴承装配

不合格的装配环境与不恰当的装配方式都有可能造成轴承工作状态异常,从而产生机械噪声。

①轴承在装配时,如果外界环境温湿度不符合要求,就会出现轴承滚珠和滚道生锈现象(如图5),加速润滑脂老化失效,降低润滑寿命;

②如果环境的洁净度较差,导致部分固体小颗粒进入轴承内。当颗粒进入高速运转的轴承滚珠和滚道间隙内时,会在滚珠和滚道表面留下压痕,造成轴承失效(如图6);

③在装配过程中,如果轴承装配方式不当,会导致轴承装入相关零件后,轴承内、外圈产生径向变形过大,引起轴承游隙异常降低。这样将导致噪声增大,严重的会导致轴承游隙为负值卡死滚动体,甚至

轴承套圈断裂^[6]。



图5 轴承滚道锈蚀

Fig. 5 Corrosion of bearing raceway

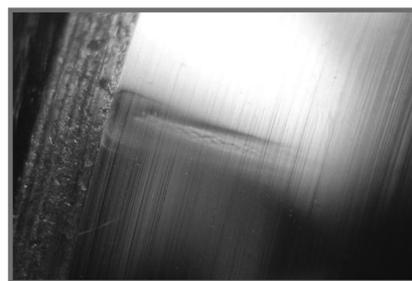


图6 轴承滚道压痕

Fig. 6 Indentation of bearing raceway

3 制冷机优化改进

通过上文分析,为降低整体式斯特林制冷机的机械噪声,需要从设计和装配工艺两方面对其进行优化。

3.1 压缩弹簧的设计优化

斯特林制冷机使用的压缩弹簧设计为双头螺旋槽形式,螺旋槽的槽宽是影响压缩弹簧性能的关键因素。分别建立槽宽为1 mm和1.5 mm的压缩弹簧几何结构模型,选取718合金为压缩弹簧的加工材料,采用ANSYS软件对室温条件下压缩活塞形变量为1 mm位移载荷状态的应力强度进行求解。

图7所示为1 mm位移载荷条件下的两种结构压缩弹簧等效应力分布云图。可以看出,在压缩状态下,压缩弹簧内侧应力大于外侧应力,最大应力出现在压缩弹簧的螺旋槽起点和终点位置。由于螺旋槽结构对压缩弹簧刚度的影响,槽宽1.5 mm的压缩弹簧较槽宽1 mm的压缩弹簧的可压缩量和刚度大。在相同位移载荷(1 mm)条件下,槽宽1.5 mm的压缩弹簧应力较槽宽1 mm的压缩弹簧应力大,槽宽1 mm的压缩弹簧应力载荷为126 N,槽宽1.5 mm的压缩弹簧应力载荷为153 N。应力载荷值越大,压缩弹簧在长时间工作过程中,越不容易出现刚度失效的问题。因此,通过优化压缩弹簧结构可有效降低压缩弹簧的在长时间工作过程中出现刚度失效的风险。

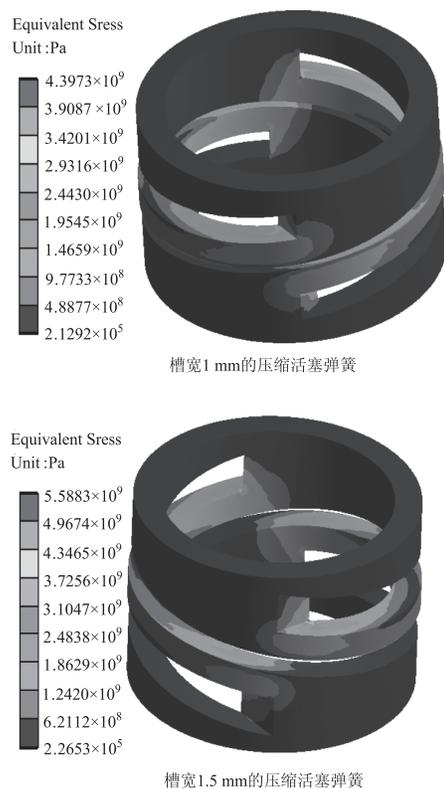


图7 压缩弹簧应力分布云图

Fig. 7 Cloud map of equivalent stress of compression spring

3.2 轴承装配工艺的优化

本次装配工艺优化工作主要针对轴承的装配进行。

3.2.1 轴承装配前的准备工作

1) 确认安装环境应在干燥、无尘的室内进行,同时确认装配的工装、夹具、手套等必须清洁,以防止将异物带入轴承内部;

2) 对于在特殊环境下的轴承,需用有机试剂(如汽油、丙酮等)将轴承自带防锈油脂清洗干净后,再更换为温度范围更宽的特种润滑油脂;

3) 已填充润滑脂的轴承如果短时间内不进行下一步装配工艺,需放入自封袋中,抽真空后放入氮气柜中进行存储。

3.2.2 轴承装配时的注意事项

轴承装配时,轴承外圈与对应安装轴承的孔尺寸选择应为间隙配合。在装配过程中,禁止使用工具敲击轴承,以避免在安装过程中出现滚动体受力导致轴承滚道与滚动体出现相对位移,从而造成滚动体挤伤现象。

3.2.3 轴承装配后的检查工作

1) 用小压力氮气吹动轴承外圈使其转动,检查轴承运转是否自如;

2) 检查轴承空载和带负载运转时,噪声和振动是否正常;

如果在检查过程中出现轴承运转异常情况,需针对故障现象进行分析排查,进行返工维修。

4 优化后的制冷机机械噪声测试

4.1 机械噪声测试参考标准及方法

优化后制冷机机械噪声测试按 GB/T 6882 - 2016《声学 声压法测定噪声源声功率级消声室和半消声室精密法》中规定执行,在某研究所的声学实验室进行测试,该实验室本底噪声为 7.0 dB(A)。通过该测试结果对斯特林制冷机进行了优化前后的机械噪声测试对比。

机械噪声的测试方法主要是在半消声室中(如图 8)测量包围噪声源的测量表面上的平均声压级,从而确定噪声源的声功率级^[7]。测试人员在假定半径为 r 的半球面反射面上方的自由场,按规定设置 N 个固定坐标位置的传声器(如图 9),分别记为点 1、点 2、点 3……。声压级的测量将从离测试声源声中心开始,到测量表面为 r 的半球。声压级沿每个传声器路径以等距离点测量。在每个状态测试过程中采集的噪声信号将由传感器通过测试线将信号传输到半消声室外的数据采集设备上,随后通过软件计算得到半径为 r 的半球面表面的“表面平均声压级”,通过计算得到噪声源的“声功率级”。



图8 半消声室

Fig. 8 Semi-anechoic room

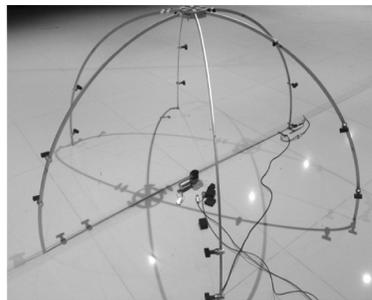


图9 半球面传声器

Fig. 9 Hemispherical microphone

4.2 制冷机机械噪声测试结果及分析

测试制冷机优化前后的机械噪声,启动过程和闭环稳定工作的结果如表1、表2所示。

由测试结果可以看出,优化后的斯特林制冷机启

动过程中及闭环稳定工作状态的噪声源声功率级较原始状态有明显降低,平均值可降低约 10 dB(A)。证明针对压缩弹簧的设计和轴承装配工艺的更改优化对降低噪音有效,实现了优化的目标。

表1 优化前后的噪声测试结果(启动过程)(单位:dB(A))

Tab.1 Noise test results before and after optimization(startup procedure)(Unit:dB(A))

状态	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10	平均声压级	噪声源声功率级
测量球面半径 $r=1\text{ m}$												
原状态	55.48	59.89	61.46	51.71	51.64	57.02	59.23	50.55	59.05	59.60	57.92	65.9
更改后状态	41.43	49.45	47.84	44.50	44.63	42.67	46.38	44.07	47.57	49.58	46.58	54.6

表2 优化前后的噪声测试结果(闭环稳定工作状态)(单位:dB(A))

Tab.2 Noise test results before and after optimization(Steady working condition)(Unit:dB(A))

状态	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10	平均声压级	噪声源声功率级
测量球面半径 $r=1\text{ m}$												
原状态	41.40	48.42	47.95	42.17	43.68	45.24	49.07	40.60	47.58	48.22	46.38	54.4
更改后状态	30.33	40.94	39.39	36.42	35.48	32.91	38.00	37.47	38.84	39.99	37.89	45.9

5 结论

整体式斯特林制冷机的降噪研究是决定其工程化应用的关键,也是用户非常关心的问题。为实现制冷机机械噪声降低的优化目标,本文对 0.7W 制冷机进行了机械噪声产生原因的分析。然后利用 ANSYS 有限元分析软件对压缩活塞弹簧的槽宽进行了设计改进,同时对轴承装配工艺中出现的不当操作进行了优化完善,改进后的制冷机机械噪声从启动过程中的 65.9 dB(A)降低至 54.6 dB(A),闭环稳定工作状态中的 54.4 dB(A)降低至 45.9 dB(A)。一定程度上降低了制冷机的机械噪声,达到了优化的目的。

参考文献:

[1] Zhang Wei, Chi Guochun, Zhang Guogang. Application of stirling cooler in IR system[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(12): 1106-1109. (in Chinese)
张巍,迟国春,张国刚. 斯特林制冷机在红外系统中的应用[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1106-1109.

[2] Chi Guochun, Lu Xuchen, Wen Jianguo, et al. Study on miniaturization and large capacity of rotary & intergal Stirling cooler [J], Cryo. & Supercond, 2018, 47(2): 24-27. (in Chinese)
迟国春,卢旭辰,温建国,等. 一款小型化大冷量旋转集成式斯特林制冷机的研制[J]. 低温与超导, 2018,

47(2):24-27.

[3] Luo Gaoqiao. The friction surface wear-out analysis and structure improve of rotary stirling cryocooler [C]//Proceedings of the 9th National Cryogenic Engineering Congress, 2008:243-245. (in Chinese)
罗高乔. 旋转式斯特林制冷机摩擦副磨损统计分析与结构改进 [C]//第九届全国低温工程大会论文集, 2008:243-245.

[4] Shan Weigen, Ye Zhong, Zheng Zhenzhen, et al. Balance weight design on integral rotary stirling cryocooler [J]. Cryo. & Supercond, 2015, 43(6): 29-32. (in Chinese)
单伟根,叶重,郑珍珍,等. 整体旋转式斯特林制冷机平衡块设计 [J]. 低温与超导, 2015, 43(6): 29-32.

[5] Ye Zhong, Sheng Chunchen, Wang Bo, et al. Computer aided dynamics design of integral rotary stirling cooler [J]. Cryogenics, 2017, 218(4): 29-35. (in Chinese)
叶重,绳春晨,王波,等. 旋转整体式斯特林制冷机计算机辅助动力学设计 [J]. 低温工程, 2017, 218(4): 29-35.

[6] Li Zhongqin. Brief analysis of motor bearing selection [J]. Micromotors, 2008, (7): 78-81. (in Chinese)
李忠勤. 浅析电机轴承选用 [J]. 微电机, 2008, (7): 78-81.

[7] GB/T 6882—2016, Acoustics-determination of sound power levels and energy levels of noise sources using sound pressure-precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms [S]. (in Chinese)
中国国家标准化管理委员会, GB/T 6882—2016, 声学声压法测定噪声源声功率级消声室和半消声室精密法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.