摘要：制冷型红外探测系统以其探测距离远、分辨率高和响应速度快等优势广泛应用于军事等领域。本文在介绍制冷式红外探测系统结构特性基础上，通过分析红外探测系统工作机理，发现制冷装置的优劣直接影响到红外探测系统的性能。针对目前战机领域应用较多的基于相变制冷、辐射制冷及半导体制冷原理构建的制冷装置，研究影响红外探测系统制冷装置性能可能性因素，对开展战机制冷式红外探测系统日常保障、故障维修具有较强的指导意义。

关键词：机载；红外探测系统；制冷装置；影响因素
中图分类号：TN215　　文献标识码：A　　文章编号：1006-883(2020)06-0014-05
收稿日期：2020-04-26

机载红外探测系统制冷装置影响因素研究

杨明绪　李林　欧阳寰
海军航空大学青岛校区，山东青岛 266041

一、引言

红外探测系统在航空、航天、工业等领域的应用日趋成熟，特别是在军事需求的推动下发展迅猛。近年来非制冷式焦平面红外探测器以其结构简单、价格低廉、体积小巧等优势发展较为迅速，也取得了较大的成绩。但在一些对红外探测系统成像精度要求高、响应速度要求快及工作环境恶劣的场合，制冷式红外探测系统仍然占据着主导地位，发挥着重要作用[1]。众所周知，制冷式红外探测系统能否正常工作主要受制冷装置的性能制约，制冷装置的运行效能从一定程度上影响着整个红外探测系统的成像情况。目前国内多款战机均装备有红外探测系统，作为雷达系统的辅助，用于对地、空目标的探测。红外探测系统的制冷装置影响因素研究对战机维护保障有着很强的指导意义。

二、战机红外探测系统及其原理

凡是温度在绝对零度以上的物体都能够向外进行红外辐射，这就使红外探测系统成为一种不受目标类型限制的探测手段。通常物体的温度越高，辐射出的红外能力越强，波长越短。物体的红外辐射波长特性反映了物体表面的温度特性，是物体的本质特性之一。因此地面重要军事设施、舰船、飞机都有较为明显的红外特征波长，我们通过对特征波长进行分析就可以完成对目标的探测。这些红外辐射虽不可见，但我们可以通过红外探测系统进行探测，并通过图像处理电路将其转化为直观的视频图像，辅助飞行员对目标进行判读、分析及决策。

1、总体结构

红外探测系统主要由光学系统、光机扫描器、红外探测器、探测器接口电路、信号处理电路、图像处理电路、制冷装置、图像处理系统和监视器等构成。其原理框图如图 1 所示。

其中光学系统主要由各种棱镜、透镜、反射镜和滤光镜等光学元件组成。主要实现探测视场的确定，减少辐射通量的损失，实现光学信号的滤波等功能。光机扫描装置主要有步进电机系统、传感器、扫描驱动，用于对光学系统的操纵，增大可视角度。红外探测器

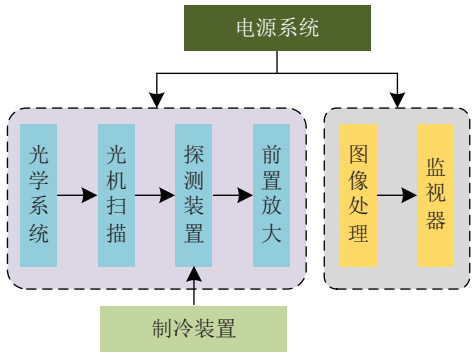

图 1 红外探测系统原理框图

是整个系统的核心器件，可以将我们肉眼看不到的红外辐射转化成可测、好用的电信号供图像处理系统使用。图像处理系统是电子成像单元和图像处理单元的综合，主要对红外探测器输出的电信号进行采集、传输、分析和加工，先进的图像处理系统也可以提升红外探测系统的各项性能指标 [2]。监视器主要是对处理后的信号显示，供操作人员对图像进行人工判读，完成后续操作。

2、系统原理

红外辐射通过光学系统将给定视场的红外辐射波长传递给红外探测器，红外探测器将我们看不到的红外辐射信号转换为可测量的电信号，并通过探测器接口电路输出至信号处理电路。经过信号处理电路进行整流、滤波及放大作用，以 LDVS 视频的形式发送给图像处理机，最终将红外辐射的特征图像显示到监视器上。通过分析可以看出，整个系统效能的核心器件就是红外探测器，可以说探测器性能的优劣直接影响到红外信息的显示效果，而探测器的工作正常与否很大程度上决定于制冷装置的工作情况 [3-4]。

三、战机制冷装置及其作用

通过系统框图可以知道，制冷器是直接作用到红外探测器上的，主要用于红外探测器的制冷工作。所以通常我们在制冷式红外探测系统开启时要等待几分钟的时间，这段时间就是制冷装置启动为红外探测器制冷，使红外探测器达到正常工作所需的温度。通常战机上应用的半导体红外探测器在 77K 的温度下性能参数为最佳状态，探测器配备的制冷装置的制冷效能就显得尤为重要。

1、制冷装置

红外探测器需要进行制冷，其截止波长与制冷温度成正比。通常探测 3μm~5μm 波长的器件需要制冷到 190K 左右，而 8μm~14μm 波长的器件需要制冷到 77K。制冷器的工作原理根据状态不同分为物理和化学两种方法，通常根据红外探测器需要的温度差异来确定制冷方法。由于在设备使用过程中要求装机尺寸小型化、寿命长期化，所以红外探测器制冷装置多为物理方法 [5]。

2、主要作用

探测器成像是红外辐射作用于探测器的像元，产生热生载流子，热生载流子就是成像信号。该信号在读出电路的作用下可以转换为电压或电流信号输出。探测器像元产生热生载流子还有一个条件就是能带宽度（禁带宽度），只有光子的能量大于能带宽度时，探测器的电子才能实现跃迁，也就是能够产生载流子，如图 2 所示。光子的频率是和能量有关的，能量越高波长越短，所以红外探测器都是低能带（窄禁带），半导体内部电子在温度的作用下也会产生高能电子，越过禁带变成载流子，从而形成噪声。通过制冷装置可有效提高系统信噪比，系统信噪比主要是指有效信号与噪声信号的比值。一般说来信噪比越大，混在信号里的噪声越小，反应目标的清晰度就越高。通过制冷的方式屏蔽或减小系统带来的热噪声可以有效提高信噪比 [6]。从某种意义上来讲，降低器件温度可以降低系统噪声，提升信噪比。

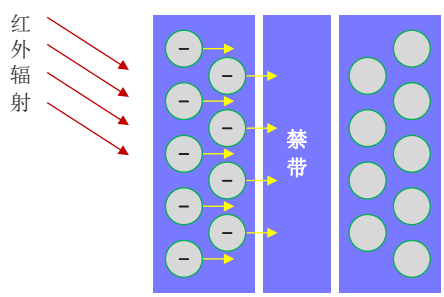

图 2 热生载流子示意图

通过制冷装置形成适宜的低温、恒温的环境，以保证需要在低温下工作的电子器件或系统功能正常，从而显著提高器件的动态响应时间。提升动态响应时间通俗地讲就是提升系统的灵敏度，也就是让红外探测系统对红外辐射更加敏感[7]。热敏元件如果想感知被测物体的热辐射，必须要将探测元件本身降至一个较为低级别的温度区间，这样其感知的温度范围将会增大，灵敏度随之提高。与此同时，动态范围的增大可以使探测器的显示层次更加丰富，极大地增强系统的精度。

四、机载常用制冷装置

制冷装置的工作原理包括物理和化学两种方法。可以根据使用场合和所需要制冷温度的不同，应用不同原理制成适当的制冷装置。目前热成像系统使用的多为物理方法。

1、相变制冷

相变制冷是利用液体在低温下的蒸发过程及固体在低温下的熔化或升华过程向被冷却物体吸收热量。由于液体自身具有流动性，液体气化制冷是广泛应用的。为了使其连续不断地工作，成为一个循环，便必须使制冷剂在低压下蒸发汽化、蒸气升压、高压气体液化和高压液体降压。常用的杜瓦瓶制冷、气体节流制冷器和斯特林制冷机都是利用相变制冷原理设计[8]。常用液态制冷剂如表 1 所示。

表 1 常用液态制冷剂

制冷剂	气化温度（K）	制冷能力（W·h/L）	比重（kg/L）
干冰	194.6	-	-
液氧	90.2	67.6	1.139
液氮	77.3	44.4	0.8075
液氖	27.1	28.9	1.211
液氢	4.2	0.71	0.1247

2、辐射制冷

辐射制冷是专为在宇宙空间工作的人造卫星或宇宙飞船上的红外遥感系统的制冷装置，是利用宇宙空间自然的高真空、超低温的有利条件被动式制冷技术。辐射制冷装置一般设计安装在卫星背阳面的位置，以减少热辐射的输入。其制冷温度可达 100K，功耗低、长寿命、高可靠等特性在卫星红外遥感领域应用广泛。

3、半导体制冷

半导体制冷装置是指利用半导体的热—电效应制取冷量的器件，又被称为热电制冷器。使用导体连接两块不同的金属，接通直流电后一个节点处温度降低，另一个节点处温度升高。一对半导体热电元件所产生的温差和冷量都很小，实用的半导体制冷器是由很多对热电元件经并联、串联组合而成，也称热电堆。该制冷装置适合给 195K ~ 300K 范围内工作的探测器制冷。

五、机载制冷装置影响因素分析

制冷装置的制造工艺至今仍是红外探测系统研制的关键技术。对于制冷装置性能影响的内外部因素多样。

1、“冰膜”覆盖影响

近期通过科学研究发现，红外探测系统的制冷装置在运行过程中由于设备中存在一定的湿度，当温度骤降时，在红外探测器元件表面会形成一种类似“冰膜”的物质覆盖。由于这层“冰膜”覆盖导致了系统的光谱响应在特定的波段有所下降，影响红外探测系统的整体性能，特别是在红外探测系统运行初期这种情况尤为严重。

2、环境温度影响

对于红外探测系统状态数据值通常都是在常温、常压下在实验室条件测试给出的。根据国军标规定，系统性能指标参数是在 25℃（工业术语中按 20℃）和 10^5 Pa 气压下的测试数据。而通常情况下战机红外探测系统根据地面工作条件的不同，其外部工作温度可达 40℃ ~ 80℃，是系统性能指标测试温度的 3~4 倍。虽然外部环境是与红外探测器件相对隔离，但这样高的环境通过热量的传导作用仍然会从温度较高的部分沿着物体传到温度较低的部分，从而影响制冷装置制冷的初始温度[9]。通常用导热率 K 来描述物体的导热能力，构成探测器结构的金属是热的良导体，根据傅立叶方程：

$$Q=\frac{KA\Delta T}{d} \quad (1)$$

其中，Q —导热量；

K —导热率（导热系数）；

A —等温表面积；

ΔT —温度差；

d —导体厚度。

$$R=\frac{A\Delta T}{Q} \quad (2)$$

其中，R —热阻值。

将公式（1）与（2）合并，可得到 $K=\frac{d}{R}$。通过合并公式我们可以发现，导热率与物体厚度成正比，与物体的热阻值成反比。

通过分析发现，外部的高温能够影响制冷装置的效能，从而对红外探测系统的运行带来一定程度的不稳定性。从系统性能来看，高温可能导致红外探测设备不能按照规定时间将探测器迅速降至特定工作温度，可能造成设备启动时间延长，较为严重的情况还会影响红外系统探测精度。

3、气密性影响

气密性是指某设备对液体或气体的泄漏程度。这一指标的影响因素较多，如零件的加工制造质量，设备的装配质量等。如果设备的气密性不好，对系统探测影响极大，所以在战机红外探测系统中对设备的气密性要求较高。通常使用高气密性橡胶垫片来改善系统的气密性问题，高气密性橡胶多数都是不易透气的丁基橡胶[10]，其透气性很小，空间位移阻力较大；结晶的橡胶分子链排列紧密有序，气体在聚合物等分散速度与聚合物分子的热活动有关，丁基橡胶分子链中侧甲基陈列密集，限制了聚合物分子的热活动，因而透气率低，气密性好。但由于橡胶在低温和高温时性能与常温性能差异极大，且在日常使用过程中存在老化现象，会不同程度影响设备的气密性，而海军机场都是沿海分布，湿度、盐度和温度都极大影响橡胶垫片的性能，可能导致气密性不好的现象发生。

六、结语

研究表明，机载红外探测设备制冷装置的性能优劣、稳定与否直接影响战机对目标探测的响应速度和成像精度，从而极大地影响战机作战效能。武器装备设计、定型是多种影响因素综合评估而产生最优方案，针对使用地域的温度差异、“冰膜覆盖”等影响因素，目前通常采用定期充氮的方法保证红外探测设备制冷装置的运行可靠性，将来可以通过新材料技术、新封装技术应用对可能的影响因素进行修正完善。通过对制冷装置总体分析研究红外探测设备制冷系统的影响因素，有助于装备研制单位对装备性能方案进一步优化，也有助于装备维护保障人员进行故障原因分析与排除。

参考文献

[1] 冯涛，金伟其，司俊杰．非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态 [J]. 红外技术，2015(03): 177-184.

[2] 雷述宇，方辉，刘俊，何熙．国产 640×512 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术，2013(12): 759-763.

[3] 王强，张有刚．非制冷红外焦平面探测器封装技术研究进展 [J]. 红外技术，2018(09): 837-842.

[4] 张云胜，冯飞，魏旭东，戈肖鸿，王跃林．光读出红外成像芯片真空封装研究 [J]. 传感器与微系统，2015(02): 44-46.

[5] 仇寻，郭祥虎，王典，孙利杰，施祥蕾．Si/GaAs 晶圆片键合热应力及其影响因素分析 [J]. 半导体光电，2016(06): 813-817, +845.

[6] 乔中辰，汪佳颖，何文文．圆片级封装工艺简介及其最新发展趋势 [J]. 中国集成电路，2013(09): 59-62.

[7] 刘文胜，黄宇峰，马运柱．Au80Sn20 合金焊料的制备及应用研究进展 [J]. 材料导报，2013(11): 1-6.

[8] 蒋明霞，申杰，唐洁影．MEMS 器件 WLP 封装温度特性的有限元模拟分析与实验 [J]. 电子元件与材料，2012(09): 50-54.

[9] 李金龙，熊化兵，罗俊，李双江．气密性陶瓷封装内热应力的 ANSYS 分析 [J]. 微电子学，2012(01): 130-133, +140.

[10] 刘培生，仝良玉，黄金鑫，等．圆片级封装的研究进展 [J]. 电子元件与材料，2012(01): 68-72.

Study on the Influence Factors of Refrigeration Unit of Airborne Infrared Detection System

YANG Ming-xu, LI Lin, OU YANG-huan

(*Naval Aeronautical University Qingdao Branch, Qingdao* 266041, *China*)

Abstract: The refrigeration infrared detection system is widely used in the military field because of its advantages of long detection range, high resolution and fast response. In this paper, the structure characteristics of the infrared detection system are introduced, and the working mechanism of the infrared detection system is analyzed. Aiming at the refrigeration devices based on the phase change refrigeration, radiation refrigeration and semiconductor refrigeration principles which are widely used in the field of aircraft, the research on the possible factors affecting the performance of the refrigeration devices of the infrared detection system has a strong guiding significance for the daily support and fault maintenance of the refrigeration infrared detection systems of aircraft.

Key words: airborne; infrared detection system; refrigeration; influencing factors

作者简介

杨明绪：海军航空大学青岛校区，讲师，机载火控装备教学与研究，职业教育教学研究

通信地址：山东省青岛市李沧区四流中路 2 号 二系

邮编：266041

邮箱：brainsummer@163.com

李林：海军航空大学青岛校区，讲师，机载光电设备、机载显控设备教学与研究

欧阳寰：海军航空大学青岛校区，副教授，航空火控原理教学与研究