

红外凝视成像系统及其 工程技术设计

红外成像系统靠探测目标与景物之间的辐射温差来产生景物的图像,它不需要借助红外光源和夜天光,是全被动式的,不易被对方发现和干扰。随着计算机技术的发展,很多红外成像系统都带有完整的软件系统,可实现图像处理和图像运算等功能,以改善图像质量。红外成像系统产生的信号可以转换为全电视信号,实现与电视兼容,使其具有与电视系统一样的优越性,如可以多人同时观察、录像等。而且它还能透过伪装,探测出隐蔽的热目标。由于红外成像系统本身的特点,使它在战略预警、战术报警、侦察、观瞄、导航、制导、遥感、气象、医学、搜救、森林防火、冶金和科学研究等军事和民用的许多领域中都得到了广泛的应用。

在红外成像系统中,多采用红外焦平面(探测器)阵列,它相对于单元探测器和线列探测器具有体积小、功耗低、探测器面宽、可同时监视多个目标等优点。由于(红外)焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)由排成矩阵形的许多微小探测单元组成,在一次成像时间内即可对一定的区域成像,真正实现了即时成像,采用红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)的无光机扫描机构的系统又叫红外凝视成像系统。

本章在综述红外热成像技术特点和红外凝视成像技术发展的基础上,介绍红外凝视成像系统的各主要组成部分及其工作原理。对比扫描型红外成像系统,说明红外凝视成像系统组成和工作原理、性能评价常用指标和具有的主要优点。分析 IRFPA 非均匀性产生的原因及其校正技术。研讨红外凝视系统中的微扫描技术。选例介绍热像仪产品概况和技术性能。并举例进行红外传感器工程设计与分析,包括工作波段的选取分析、光学系统无热化设计方法、总体对红外传感器提出的功能及性能指标要求、红外传感器工作原理与组成、红外探测器件及物镜光学参数选取。

5.1 热成像技术特点

红外成像技术,顾名思义,是利用红外辐射成像的技术,主要包括近红外(短波红外)成像技术、中波红外成像技术、长波红外成像技术,是世界先进国家都在竞相研究和发展的的高新技术。红外热成像技术主要指利用中波红外和/或长波红外成像的技术。红外成像具有很强的抗干扰能力,它可以穿透薄雾、黑夜和伪装等,并具有一定的目标识别能力,而且可以提供 24h 全天候的服务。红外成像探测器可探测到具有 0.01℃ 温差甚至更低温差的目标,它在军用和民用领域都占有相当重要的位置。由于红外线对极大部分的固体及液体物质的穿透能力极差,因此红外热成像检测是以测量物体表面的红外辐射能量为主。

人眼所能觉察的电磁辐射波段很窄。人们周围物体在可见光波段的反射、透射和散射,使人们得以看见周围的物体。在可见光波段内,温度 $T > 900\text{K}$ 的物体发射出易于被人们发觉的能量。

热成像技术肩负的任务,是把环境温度下物体的本征辐射变成可以看得见的图像。为此必须解决能量摄录仪器问题,要使这种仪器能够摄录红外波段的热辐射,能够进行非接触探测并将景物的空间能量结构显示出来。只有采用电子方法才有可能,因为信息存储介质只有通过周围的辐射才能够像照相机那样被曝光。

在电磁光谱图 5.1 中,特意放大了热成像技术涉及的波段。可见光波段中的不同波长被人的眼睛感觉为紫色、蓝色、绿色、黄色、橙色和红色。人眼的最大灵敏度是对于 $0.55\mu\text{m}$ 波长的辐射,感觉为绿色。低于 $0.38\mu\text{m}$ 波长的辐射是富能的紫外波段的开始,人的眼睛看不见紫外光。高于 $0.76\mu\text{m}$ 波长的辐射划归红外波段,这种划分反映了各种不同的应用和技术解决办法的界线。还有资料认为,在红外波段中, $3\mu\text{m}$ 波长以下为近红外,其中通常将 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 定义为短波红外,有时扩展至 $0.7\sim 2.5\mu\text{m}$; $3\sim 7\mu\text{m}$ 波段为中红外; $7\sim 14\mu\text{m}$ 波段为长波红外; $14\mu\text{m}$ 以上波段为远红外,对于热成像技术仅具有从属的意义。相对而言,中红外和长波红外被称作热红外区(热成像),短波红外往往不归属为热成像。由此可见,对这些波段的划分,在不同场合并不完全统一,具有一定的相对性。

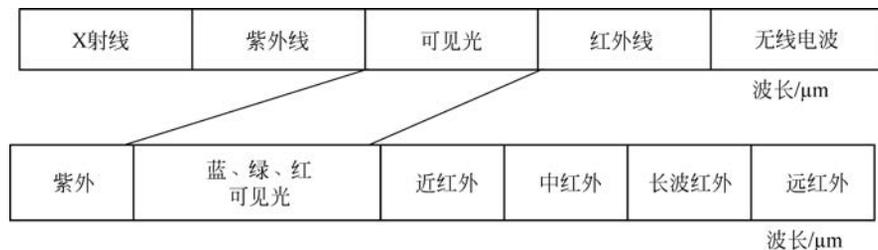


图 5.1 热成像技术涉及的电磁波段分布

应该指出的是,短波红外范围敏感是由于 InGaAs 传感器的发展才成为现实的。短波红外相对于其他波长探测而言,既具有类似可见光反射式成像可分辨细节的能力和相对明显的穿云透雾的能力,又具有不可见光探测能力,具有鲜明的不可替代的成像优势,可广泛应用于众多领域。此外,短波红外成像与人眼所看到的非常类似,在其图像上也有阴影和反差,这增强了识别能力,减少了潜在的误判,而且能够透过玻璃进行成像,以及短波红外在白天可避免可见光强光干扰,在夜晚又可以具有高灵敏探测能力,适用性广泛,可用于全天候监控。

如果将短波红外与长波红外融合,将以最大化进行目标检测和识别。短波红外与中长波红外相比较,有一项重要的差异是,它利用反射光成像,而不是热成像。短波红外这个名字,往往会把人带进误区,让人觉得跟中长波红外类似,反应的是物体温度的差异性。当中长波探测器难以看到海上目标的重要细节特征时,短波红外可以对此提供辅助。在视觉增强以及恶劣天气低能见度条件下,短波红外是热像仪的有益补充。热像仪能很好地检测出冷背景下温暖的目标,然而短波红外能很好地识别出该目标是什么,例如船舶、车辆、人员。由于处在热交叉点上,海岸与海水的细节在热成像中都丢失了,短波红外能对反射光成像而不是依赖温度差,海岸线图像清晰可辨,同时由于短波红外的透雾能力,相比可见光成像能捕获更多细节。因此,短波红外具有高灵敏度、高分辨率、能在夜空辉光下观测、昼夜成像、隐蔽照明、能看到隐蔽的激光信标、无须低温致冷、可采用常规的低成本可见光透镜、尺寸小、功率低等特点。

热成像系统的示意图如图 5.2 所示。

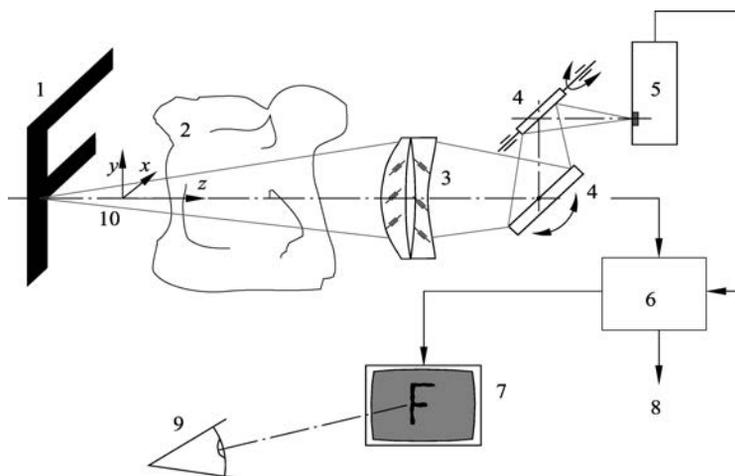


图 5.2 热成像系统的示意图

1. 与背景有关的物体；2. 大气；3. 红外会聚透镜；4. 光机扫描系统；
5. 红外探测器；6. 信号处理；7. 显示器；8. 功能启动；9. 观察者；10. 坐标系

对于热成像系统工作方式的说明,需从景物的辐射定律说起,连同待识别、待测量的物体和背景考虑。从目标和背景发射出来的辐射穿过大气后被红外光学系统聚焦到红外探测器上。由于温谱成像不是采用照相胶片而是采用适合的红外探测敏感材料,因而景物图像被分解成为一个个的像素而被瞬时依次扫描并按信号顺序编码。

信号处理的主要作用是重现景物,进行信号处理多数是要在监视器上显示,也可以采取电子方式存储并处理。功能启动在监控系统中得到实施。热像传感系统的终端是观察者,其作用是解释所获得的信息并适当地做出反应。

图 5.2 说明了从物体的本征辐射到图像显示,不需要外加光源。由于任何物体都放射本征辐射,所以这门技术可用于制造被动式夜视仪器,利用物体的本征辐射,在不需要光源的情况下能够看见物体。在过去的 40 多年中,这些优点在军事上带来的很大利益促进了热成像技术的迅速发展,在有薄雾的天气下使用红外手段,观察距离得到扩大。

在民用方面,例如温度场和辐射分布情况的显示,受益于红外探测器的发展。现在,热成像仪作为新增加的诊断设备,已在工业建筑和医学等方面占领了稳定的应用地位。

在任何一台摄录一体摄像机内,都实现了按时序分解景物。景物被一个物镜成像在 CCD 阵列元件上,在 CCD 阵列的每个像元上聚集的电荷按视频周期依次读出。令人满意的最初温谱成像结果,就是运用这样一种方式,通过最初研发的红外探测器阵列来实现的,其造价当然昂贵。第一批高分辨率热成像系统的工作是采用一个致冷的红外单一敏感元探测器加上一个光机扫描系统来实现的,该扫描系统向红外探测器传递目标景像,其原理示于图 5.2。

表 5.1 概括了采用红外探测器与扫描系统进行组合的重要应用领域。采用单一敏感元探测器和凝视视线列探测器,在研发这两种探测器的过程中,人们获得了一系列技术结合的好处,确定了多种不同的仪器概念,这些仪器概念的变化取决于价格和应用目的的不同。这类仪器的特点是所有像素具有高度的均匀性。因为受单位时间内被扫描像素数量的限制,所以系统中的振镜必须产生振动式运动。

在监控任务中,采用凝视视线列探测器有利于选用省钱的技术解决方案,为此,在红外摄像机与景物之间的相对运动由程序规定并与录像能力相配合。

高速多面转镜装有不同倾斜度的反射镜面,转镜以匀速转动,高速多面转镜对景物进行全面扫描,转镜的转动达到沿线列探测器的扫描,即以倾斜度不同的反射镜扫描成像。与此有关的红外探测器阵列的像元数与转镜相适应:反射镜的面数与红外探测器阵列的行数之积等于红外图像的行数,红外图像一行的像素数为探测器阵列每行像元数的整数倍。转镜扫描系统也称作微扫描系统,红外探测器与微扫描系统相结合,可以把噪声带宽缩小到最低程度。

表 5.1 热成像技术扫描机理

探测器结构	光机扫描系统	典型应用	产品举例
单一敏感元探测器	振镜和转镜	具有较高分辨率的测量用摄像机	AGEMA900LW FSI IQ812 Inframetrics760
凝视线列探测器	无	生产线监控,空中侦察	ZKS128
焦平面线列探测器	采用转镜:转镜表面反射镜的倾斜度各不相同	具有中等空间分辨率的测量用摄像机	Avio TV2100 FSI IQ3225
FPA 探测器	采用转镜:转镜表面反射镜的倾斜度各不相同	观察距离较远的观察仪器	Orphelios-Modul
热释电 Vidikon	无	具有较低热分辨率的观察仪器	EEV 热像仪
红外凝视阵列	无	具有较高热分辨率的观察仪器	Amber Sentinel Mitsubishi IR M500 Inframetrics Thermal-CAM

热释电 Vidikon 是最老式的红外析像器件:经典的热释电原理乃是采用电子束对所摄的景物进行扫描,通过红外专用探测器材料来敏感景物图像。热释电成像的缺点是热分辨率和空间分辨率均不高。

红外凝视阵列的应用使得在没有机械运动部件的情况下也能成像。在制造过程中必须考虑探测器像元的整齐均匀性、快速读出和校准。常规的半导体技术并不适于探测器制造。唯有半导体材料锗(Ge)、硅(Si)和砷化镓(GaAs)等少数几种能够透射热红外辐射,所以将其用作红外透镜的材料。

5.2 红外凝视成像技术的发展

人类认识五彩缤纷、千姿百态自然世界的一个主要途径就是通过眼睛的观察,然而从人类诞生到19世纪初,人类都是通过外界的光照或者物体本身发光认识自然万物,用现代科学的话说,人类通过肉眼感知自然万物发射或者反射400~760nm间的电磁波来认识自然万物的。

1800年,William Herschel为了寻找观察太阳时保护眼睛的方法,在研究太阳光谱各部分的热效应时,发现了后来被称为红外线的电磁波,揭示了人眼看不见的热辐射。他让太阳光穿过一个分光棱镜,用温度计证明了远离于可见红色光波段的一种辐射,这种红外辐射遵循与可见光波段一样的物理学定律。从此以后,人类开拓了观察、认识自然界的崭新领域——红外技术。红外技术主要研究物体红外辐射的产生、传输、探测、识别及其广泛的应用。

1830年,Nobili发明了第一个热敏元件,1833年他把这些热敏元件连接成串构成了第一个温差电池,能够把红外辐射转换成电信号。

1880年,有人首次利用温度改变电阻的方法来探测红外辐射,通过把热敏电阻按桥式电路进行排列,做成了第一个热敏电阻式辐射热测量计。

在1870—1920年期间,随着技术的不断发展,人们具有了制造量子探测器的能力。量子探测器采用全新的工作原理,无须把辐射转换为温度变化,从而可以获得数量级更高的探测灵敏度和较短的反应时间,其灵敏范围截止在近红外波段。

20世纪20年代发展起来的蒸汽成像术曾经应用于早期的热像仪。早先由Herschel发明的采用有机物蒸汽法蒸制在一种膜片上、可随温度起反应的沉积物,在当时找到了应用。在这种膜片上涂上特殊黑漆,使膜片的热辐射吸收率提高到最大限度。膜片背面贴着一个特制的小盒子,通过小盒内适当的温度/压力调节,使蒸制在膜片上的沉积物性能得到最佳发挥。使景物成像在膜片上,当曝光时间为30s时,最高可达1K的温度分辨率。

在军事应用方面,1930年德国的Gudden、Görlich和Kutscher研制成功了硫化铅(PbS)量子探测器,其灵敏范围从 $1.5\sim 3\mu\text{m}$ 波段扩展到红外其他工作波段。在第二次世界大战中,采用碲化铟(InSb)量子探测器(灵敏范围 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段)。德国人的红外测向仪作用距离,对于行船为30km,对于坦克为7km,当时所需的红外光学零部件由卡尔·蔡司·耶那(Carl Zeiss Jena)提供,从1940年起,该厂通过熔炼法制造出可以透射长波红外的透镜材料KPS-5晶体。

军事上的应用推动了红外量子探测器的进一步发展,20世纪50年代中期,第一批装备用红外寻头的自动寻向导弹投入使用。

热探测器继续保持军用优先的发展势头。1954年,出现了以温差电池为基础的红外摄像机(每帧曝光时间为20min)和以热敏电阻式辐射热测量计为基础的红外摄像机(每帧曝光时间为4min)。

1960年提出了把碲镉汞(MCT)(HgCdTe)半导体作为探测器材料,采用这种材料解决了在长波红外波段的曝光时间快且灵敏度高的问题。

1964年,瑞典AGA公司推出了660型温谱成像系统,该系统重量为40kg,采用致冷式碲化铟单一敏感元探测器配合光机扫描器,每帧曝光时间为 $1/16\text{s}$ 。同一时期,首批前视红外(Forward Looking Infra-Red, FLIR)系统装备于战车上,这种前视红外系统采用碲化铟(InSb)和锗掺汞(Ge: Hg)探测器和光机扫描器,能够观察到距离很远的目标热特性辐射。

20世纪70年代中期,通过淀积敏感区可以延伸到长波红外的热释电探测器材料,成功地研制成Vidikon摄像管,这种Pyrikon热释电摄像管与望远技术相结合,构成了热分辨率为1K的实时成像仪器,望远技术叩开了热像仪设计的大门。

20世纪80年代,商业化温谱摄影仪从量子探测器发展中获得利益。随着对MCT技术的成熟,长波红外区域可以得到利用。1986年AGEMA公司做成采用Sprite探测器的870型温谱成像系统,其功能可与线列探测器的功能相比拟。

20世纪90年代初,许多制造商发觉了民用市场的潜力。采用液氮致冷的单一敏感元探测器制成的温谱成像系统达到了当时最好的分辨率,软件组件使温谱图信息的存储和处理变得容易,计算机技术的发展成果也被结合在其中。还将CCD原理应用于红外探测器,从而产生了三代不同特点的热像仪:第一代热像仪实现了实时成像,几何分辨率和图像均匀性达到可与普通电视图像相比的愿望,所有采用扫描系统的温度分辨率达到0.2K;第二代热像仪达到了接近于电视图像质量的水平,采用热基准来校正图像的不均匀性,其热分辨率低于0.1K;而第三代热像仪的工作采用大探测器阵列,不采用(或者只采用很小的)光机扫描运动部件(称作微型扫描器),达到电视图像质量的温度分辨率,低于0.05K。

近年来,MCT的FPA技术取得的成就更加突出。通过改变组分调控禁带宽度,截止波长 $0.8\sim 16.5\mu\text{m}$ 的MCT FPA可以达到极低的暗电流,这是探测极远、极小信号的重要条件,可以做到 $2\text{K}\times 2\text{K}$

以上的阵列规模,甚至通过拼接最大可以达到 1.47 亿像元,每个像元的尺寸可以做到 $10\mu\text{m}$ 甚至更小,以实现极高的分辨率,可以实现短波、中波、长波之间各种双波段甚至三波段组合 FPA。

红外热成像技术和红外技术一样,其主要应用在军事方面,红外成像(热成像)作为红外技术的一个新领域,出现于 20 世纪 20 年代末,最早的热成像系统就是 Circa-1930 温度记录仪,这是一台颇不敏感的非扫描式装置,是采用薄膜浸积在超饱和的油化气中制作而成,其对比度、灵敏度和响应时间存在固有的限制,因而不能满足大多数热成像的要求。原始扫描热像仪以前称自动温度记录仪,它以照相胶卷记录图像,是单个探测器单元和慢帧扫描器,不是实时记录装置。1934 年在德国,第一只主动红外变相管问世。它利用光子-电子转换原理,使银氧铯光阴极接受红外辐射,由光子转变为电子,再通过荧光屏使电子转换为光子,得到人眼能察觉的图像。它在第二次世界大战和朝鲜战争的夜战中得到了应用。随后十年间,经改进的这种成像仪用作夜视镜及夜间瞄准具装备应用于美国部队。

20 世纪 40 年代,热成像的研究出现了两种不同的方向:一种是发展具有分立探测器的光机扫描系统;另一种是发展诸如红外光导摄像管一类的非光机扫描成像器件。20 世纪 50 年代期间,随着快速时间响应探测器件(如 InSb)的出现,实时快帧速热像仪应运而生,相继问世了几种实时的光机扫描热像仪。60 年代以后是热成像技术飞速发展的时期。在 20 世纪 60 年代初期,机械红外前视系统的概念由美国空军和德州仪器公司及海军和休斯飞机公司分别制定的发展计划而受到重视。经德州仪器公司近一年的探索,在 1965 年开发研制了一代用于军事领域的红外成像装置,称为 FLIR 系统。在 1960—1974 年期间,至少研制了 60 多种不同的 FLIR,产品有几百件,其地面和空中用的 FLIR 功能相类似,而且在很多情况下都是相同的。所以 FLIR 这个术语现在已经完全代表任何一种实时热像仪。比军用稍后,到 20 世纪 60 年代红外热成像技术也开始用于工业领域。世界上各个国家几乎都是从电力工业部门的应用扩展到其他应用领域的。第一套工业用红外热成像仪用于电力工业,是 1964 年由瑞典 AGA 公司和瑞典国家电力局联合研制成功的。他们采用热像探测所有的变电站,每年一次,为了避免停电,还对主要目标进行连续监测。

实质上红外热成像技术是一种波长转换技术,即把红外辐射图像转换为可视图像的技术。它利用景物自身各部分辐射的差异获得图像的细节,通常采用 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 两个波段,这是由大气透红外性质和目标自身辐射所决定的。热成像技术既克服了主动红外夜视需要依靠人工热辐射,并由此产生容易自我暴露的缺点,又克服了被动微光夜视完全依赖于环境自然光和无光不能成像的缺点。红外热成像仪具有一定透过烟雾、尘、雾、雪以及识别伪装的能力,不受战场上强光、眩光干扰而致盲,可以进行远距离、全天候观察。这些特点使它特别适合于军事应用。正因为如此,一些技术发达的国家,特别是美、英、法、俄等国竞相研究热成像技术,以巨大的人力、物力进行开发,发展十分迅速。

红外成像技术的发展过程是与红外探测器的发展密切相关的,可以说红外探测器是热成像技术的核心,探测器的技术水平决定了热成像的技术水平。在红外成像技术发展的早期,由于当时使用的红外探测器响应时间较长,热电器件的灵敏度低、响应慢,因此不可能出现实时显示的红外热成像仪。20 世纪 60 年代以后出现了多种工作在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的红外探测器,其性能也能满足红外成像技术的基本要求,因此红外成像技术开始得到了飞速发展。

红外热成像技术可分为致冷式和非致冷式两种类型,前者又有第一代、第二代、第三代之分,后者使用非致冷阵列热电探测器,被称为第四代。进入 21 世纪以来,随着非致冷焦平面阵列的性能显著提高,非致冷红外成像技术逐渐成熟,在航空航天工程和某些中、高端项目中也开始应用,并在许多应用领域有逐渐取代致冷红外成像技术和微光技术的趋势。值得一提的是,氧化钒(VO_x)和非晶硅(a-Si)是红外热成像探测器的主要热敏材料,但是目前氧化钒探测器厂商多于非晶硅探测器厂商。这两种技术路

线各有特点：氧化钒探测器的优势在于灵敏度高、噪声小，相对适用于静态观察场景；非晶硅探测器的优势在于工艺兼容性好、均匀性和稳定性高、响应快，相对适用于运动及测温场景。

第一代红外热成像系统主要由红外探测器(含致冷器)、光机扫描器、信号处理电路和视频显示器组成。图 5.3 所示为最简单的第一代红外热成像系统的工作原理图。

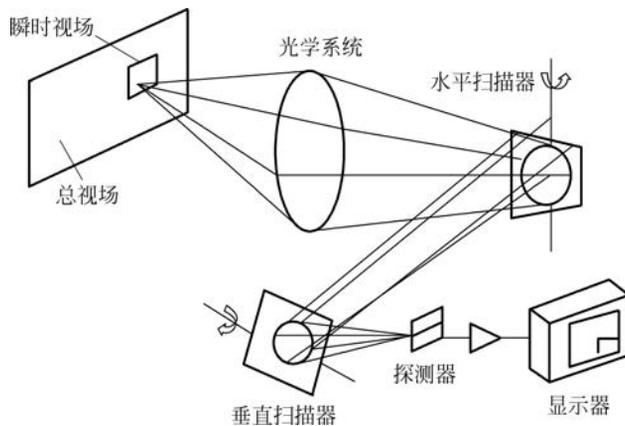


图 5.3 第一代红外热成像系统的工作原理图

第二代红外热成像系统采用位于光学系统焦平面、具有 $m \times n$ 元且带有信号处理的面阵探测器，即红外焦平面探测器阵列。它借助集成电路的方法将探测器装在同一块芯片上，并利用极少量引线把每个芯片上成千上万个探测器信号传输到信号处理器中。这种焦平面阵列的优点是，既能在焦平面上封装高密度探测器，又能在焦平面上进行信号处理。

红外焦平面探测器阵列是探测器制造技术和大规模集成电路结合的产物，有两种工作方式：一种是扫描式，其阵列规模多在 $50 \times 4 \sim 1000 \times 32$ 元(也可有更大规模)，前一数字表示分辨通道的数目，后一数字决定时间延迟和积分的次数；另一种是凝视式，其阵列规模可在 $32 \times 32 \sim 1024 \times 1024$ 元(现在甚至发展到更大规模)。阵列中元数越多，能获得视场景物的分辨率就越高。红外焦平面凝视式阵列(称为第三代红外热成像器件)日趋成熟。

自 1991 年海湾战争以后，红外夜视热成像技术更加受到关注和重视。许多国家为加强自身防御能力和提高夜战水准，不仅把热成像技术作为现代先进武器装备的重要技术纳入国防发展战略和计划，而且加大了红外热成像研制经费的投入，使得红外热成像技术不仅在军事上而且在民用上也得到了迅猛发展。

跨入 21 世纪，由前视红外热成像技术发展起来的红外热摄像技术已经历了四十余年，其应用不仅从当初的夜视目的扩展到军事领域的精确武器制导、星载和机载侦察监视、预警、隐蔽物体探测、红外搜索与跟踪等，而且扩展到了工业监测探测、执法、安全、医疗、遥感、设备前期性故障诊断与维护、海上救援、天文探测、驾驶员夜视增强仪等广阔的民用领域，而且还在向前所未有的领域进展，如微型机器人和微型飞行器等。尤其是非致冷 IRFPA 技术的飞速发展，使红外热成像系统实现了高密度、高性能、高可靠性及微型化，并得以向更为广泛的应用领域扩展。

我国红外技术的发展起步相比国外晚，特别是红外成像技术的核心部分红外探测器，更是由于探测器材料、工艺落后等原因，使我国的红外热成像系统的研发曾经长期落后于西方发达国家。如今，由于红外成像技术对于一个国家的国防和国民经济有着重要影响，我国也非常重视红外成像技术的发展，加大了对这方面的投入，形成了从核心器件到整机的相应产业，已取得明显成效。

5.3 红外凝视成像系统

红外凝视成像系统是指系统在所要求覆盖的范围内,采用红外探测器面阵充满物镜焦平面视场的方法来实现对目标的成像,即指采用 IRFPA 探测器的红外成像系统。换句话说,这种系统完全取消了光机扫描,采用元数足够多的探测器面阵,使探测器单元与系统观察范围内的目标一一对应。所谓红外焦平面阵列就是将红外探测器与信号处理电路相结合,并将其设置在光学系统焦平面上。而“凝视”是指红外探测器响应景物或目标的时间与取出阵列中每个探测器响应信号所需的读出时间相比很长。探测器“看”景物时间很长,而取出每个探测器的响应信号所需的时间很短,即“久看快取”就称为“凝视”。

由于景物中的每一点对应一个探测器单元,凝视阵列在一个积分时间周期内对全视场积分,然后由信号处理装置依次读出。由此,在给定帧频条件下,凝视型红外系统的采样频率取决于所使用的探测器数目,而信号通道频带只取决于帧频。在红外凝视成像系统中,以电子扫描取代光机扫描,从而显著地改善了系统的响应特性,简化了系统结构,缩小了体积和重量,提高了系统的可靠性,给使用者带来极大的方便。

5.3.1 红外凝视成像系统的组成和工作原理

红外凝视成像系统一般由红外光学系统、IRFPA 探测器、信号放大及处理和显示记录系统等组成。其组成方框图如图 5.4 所示。

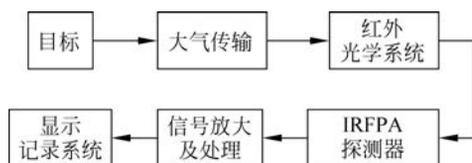


图 5.4 红外凝视成像系统组成方框图

系统设计时应使工作波长与应用相匹配。红外波长的光谱通常分为三个光谱带:短波红外(SWIR)、中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)。每个频段各有如下自身特点:

短波红外(波长约 $1\sim 3\mu\text{m}$)一般应用于产生清晰的图像,因为与可见光一样,光子也会被物体反射、吸收和散射,从而产生较高分辨率所需的高对比度。处理短波红外的传感器至今还比较昂贵。由于这一因素,基于短波红外的应用通常集中在高价值领域,如防伪、过程质量控制、医学成像和半导体制造等。

中波红外(约 $3\sim 5\mu\text{m}$)是检测快速温度波动并避免从大气条件散射的理想选择。MWIR 系统往往需要内部冷却,因此价格更高。MWIR 系统通常用于关键任务的应用中,如识别战斗机的排气、工业热成像等。

长波红外(大约 $8\sim 14\mu\text{m}$)具有最广泛的应用范围,尤其是在公共安全领域。LWIR 摄像机可用于高精度测量物体的表面温度分布;这样的系统即使在很远的距离或完全黑暗的情况下也能实现热辐射成像。LWIR 的图像分辨率可能会较差,但这并不会影响其应用。LWIR 可用在包括建筑物检查、热成像监视、个人夜视、消防员的搜救工具以及其他低成本非冷却系统等。

在过去的一些年中,大多数红外系统的核心用途仅限于军事和工业领域。但是,在其他领域使用红外热像系统已逐渐形成普遍趋势。

由于红外辐射的特有性能,使得红外成像光学系统具有以下一些特点:①红外辐射源的辐射波段一般位于 $1\mu\text{m}$ 以上的不可见光区,普通光学玻璃对 $2.5\mu\text{m}$ 以上的光波不透明,而在所有可能透过红外波段的材料中,只有为数不多的材料有需要的机械性能,并能得到一定的尺寸,如锗、硅等,这就大大限制了透镜系统在红外光学系统设计中的应用,使反射式和折反射式光学系统占有比较重要的地位;

②为了探测远距离的微弱目标,红外光学系统的孔径一般比较大;③ $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的红外光学系统必须考虑衍射效应的影响;④在各种气象条件下或在抖动和震动条件下,具有稳定的光学性能。

红外成像光学系统应该满足以下几个方面的基本要求:物像共轭位置、成像放大率、一定的成像范围,以及在像平面上有一定的光能量和反映物体细节的能力(分辨力)。

传统红外光学系统的结构形式,一般可分为反射式(见图 5.5(b)、(c)、(d))、折射式(透射式)(见图 5.5(a))和折反射式(见图 5.5(e)、(f))三种,后两种结构形式需采用具有良好红外光学性能的材料。新型红外光学系统结构形式主要有折衍混合系统、定焦离轴两反系统、定焦离轴三反系统、双视场光学系统、机械反射变焦光学系统(共轴反射变焦光学系统、离轴反射变焦光学系统)、主动反射变焦光学系统(三反主动变焦光学系统、四反主动变焦光学系统)、自由曲面光学系统等。

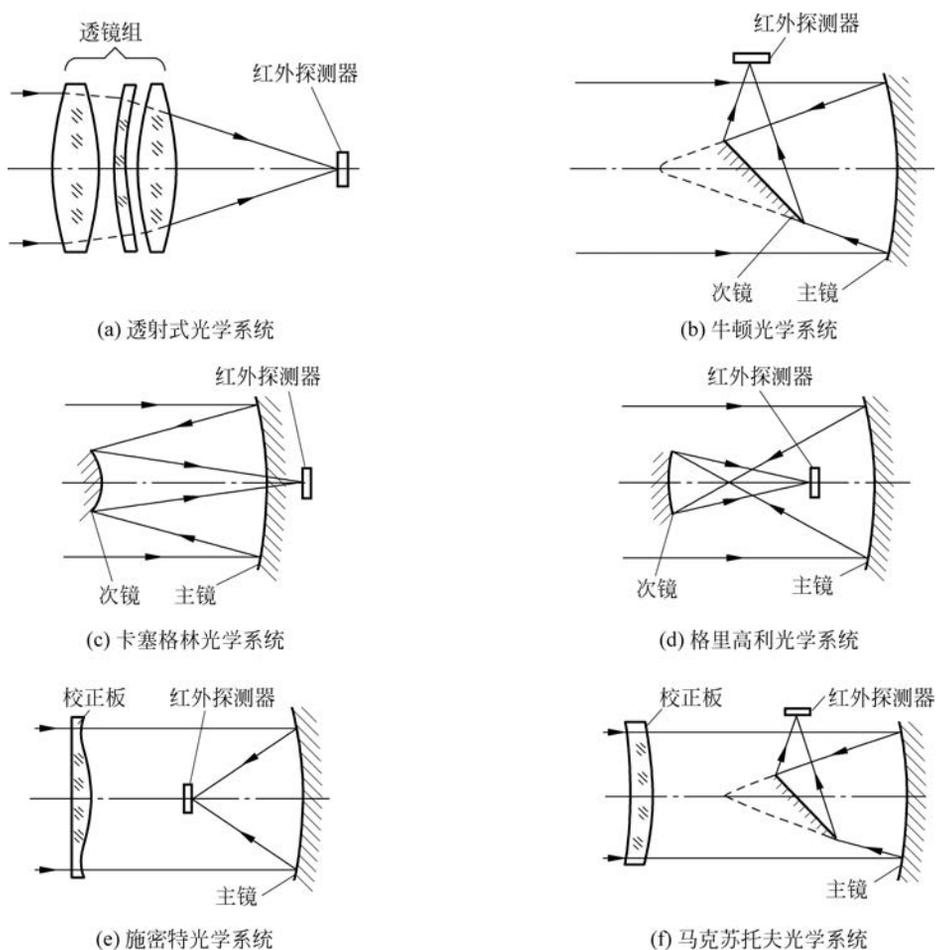


图 5.5 红外凝视成像系统的光学系统结构示意图

在红外凝视成像系统中,IRFPA 探测器作为辐射能接收器,通过光电变换作用,将接收的辐射能转变为电信号。再将电信号放大、处理,形成图像。IRFPA 探测器是构成红外凝视成像系统的核心器件。IRFPA 探测器可分为两大类:致冷 FPA 探测器和非致冷 FPA 探测器。致冷红外焦平面阵列探测器是当今使用较多的 IRFPA 探测器,为了探测很小的温差,降低探测器的噪声,以获得较高的信噪比,红外探测器必须在深冷的条件下工作,一般为 77K 或更低。为了使探测器传感元件保持这种深冷温度,探测器都集成于“杜瓦瓶”组件中。这种杜瓦瓶尺寸虽小,但由于制造困难,所以价格特别昂贵;杜瓦瓶实

红外凝视成像系统的工作原理：红外光学系统把目标的红外辐射集聚到红外探测器上，并以光谱和空间滤波的方式抑制背景干扰。红外探测器将集聚的辐射能转换成电信号。微弱的电信号经放大和处理后，输送给控制和跟踪执行机构或送往显示记录装置。信号处理系统把前置放大器输出的信号进一步放大和处理，从信号中提取控制装置或显示记录设备所需的信息。一般非成像系统视目标为点辐射源，相应的信号处理和显示记录系统比较简单。红外成像系统通常需将目标红外辐射转换成黑白或伪彩色视频图像。这种图像不像可见光摄像机所得的图像那样直观，它反映的是目标的辐射温度分布。

5.3.2 红外光学材料

对应于地球大气在红外波段的传输窗口，如图 5.8 所示，红外光学系统主要针对三个工作波段：短波红外、中波红外和长波红外。

应用于红外光学系统的材料首先需要在这三个红外波段具有良好的透过率。除此之外，由于红外光学系统大多用于一些条件较为严苛的工作环境，所以对红外材料的热力学性质（热膨胀系数、折射率温度系数）、硬度、断裂模量/抗折强度、化学稳定性等物理、化学特性都提出了较高的要求。常用于红外光学系统的材料包括硅（Si）、锗（Ge）、硫化锌（ZnS）、硒化锌（ZnSe）、氟化物晶体[氟化钙（CaF₂）、氟化钡（BaF₂）、氟化镁（MgF₂）等]、卤化物晶体[溴化铯（CsBr）、溴化钾（KBr）、碘化铯（CsI）等]，以及硫系玻璃等。

二氧化硅（SiO₂）等氧化物玻璃，独特而卓越的性能统治着光学领域。光谱范围覆盖了从紫外、可见光到近红外，其中红色是人眼视网膜敏感的区域。SiO₂ 以方晶石到石英的多种形式存在。SiO₂ 是出色的玻璃成型剂，材料的机械强度高，也能较好的抵御结晶和腐蚀。

SiO₂ 玻璃有一个缺点：波长超过 3 μ m 不透明。透明度的限制是由于 Si-O 化学键的高振动模式（high vibration mode）。

为了研发出能够透射超过 3 μ m 波长的光学器件，要寻找化学键较弱且由较重原子组成的新成分。氟化物和硫属化物玻璃有良好的优势。在长波长应用具备潜力的是第 VI 族元素—硫族元素 S、Se 和 Te 足够重要，可以透射红外光。还表现出一些有益的玻璃性能和良好的化学稳定性。制造出实际的硫系玻璃，最重要的是玻璃需要有足够强的机械性能，能形成大块的玻璃。可以找到大量的硫系玻璃照片，如图 5.9 所示的玻璃块具有典型的 Se-As-Ge 成分，可以透射 1~15 μ m 的光，看起来更像一块金属。

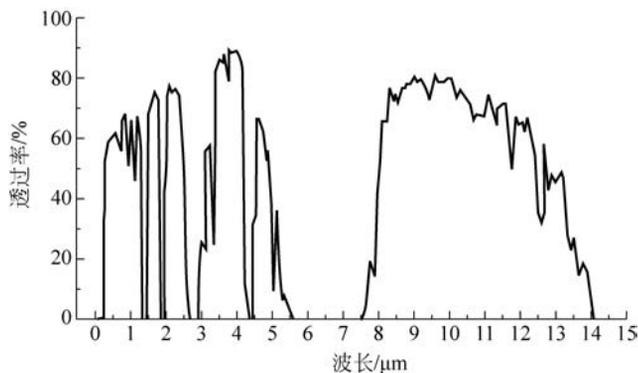


图 5.8 地球大气在红外波段的传输窗口



图 5.9 Se-As-Ge 成分的玻璃

硫系玻璃在紫外和可见光波段显示出较差的透射率。大多数 Se 玻璃是黑色的（或者金属色）。石英玻璃在 2 μ m 以内导光非常通透，之后是氟化物玻璃、硫元素玻璃、硒元素玻璃、碲酸盐玻璃等。Se 和

Te 玻璃导光性可覆盖非常重要的光学区域(大气窗口)。

根据黑体定律,温度较高的物体会发出较多红外辐射。室温下的物体(包括在正常体温下的人类)在波长 $10\mu\text{m}$ 附近发射大部分能量。发射功率约为 1W/kg 。这种辐射可以通过由 Se 玻璃制成的光学探测系统所捕获。与其他红外晶体材料(如单晶 Ge)相比,Se 玻璃的优势在于:它们的成本以及在玻璃转化温度(T_g)以上压制成型的可能性。硫系玻璃的成型能力较强。压制硫系玻璃的方式有不少,硫系玻璃的热稳定性良好,及在 T_g 点以上的温度滞留较长的时间也不至于析晶。另外 T_g 点一般也比较低,容易压制成型。最后,这种玻璃材料的脱膜工艺也较为简单。是一种适宜操作的材料,应用前景好。日益增长的高质量红外玻璃材料新需求,使光学系统变得更小、更轻,并且不需要内部冷却系统。

应该指出,硫系玻璃是指以元素周期表第六主族(VI A)元素中除氧以外的硫、硒或碲等元素为主,引入一定量其他金属或非金属元素形成的非晶态材料。如硫化砷(As_2S_3)玻璃、硒化物玻璃、碲化物玻璃,以及多样组份的硫化物玻璃(如 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 等)。与氧化物玻璃相比,硫系玻璃具有较长的红外截止波长($>12\mu\text{m}$),其透过波段可覆盖三个红外大气窗口,是一种优异的红外光学材料。硫系玻璃拥有可精密模压成型和优异折射率热差性能等优势,可制作消热差光学元件或廉价红外透镜,已应用于高低端的红外成像系统中。除此之外,硫系玻璃还在相变(随机)存储器、红外光纤(微结构光纤)等方面实现了商业应用;由于拥有低声子能量($200\sim 400\text{cm}^{-1}$)、高三阶非线性折射率(约为石英玻璃的 1000 倍)、独特的光敏性和多种光致效应等特点,在多类新型光电器件(全光芯片、固态电池等)中也有较好的潜在应用价值,是一种极具研究价值的非晶态材料。

如图 5.10 所示为多种常见红外光学材料的透过光谱图。这些材料中卤化物在短波、中波、长波红外波段均具有较高(约 90%)的透过率。但是卤化物的机械性能极差,且易受潮解,因此较多用于温度、湿度有良好控制保障的实验室环境。氟化物材料硬度适中,但是折射率较低,且在长波红外波段透过率不高,因此较难用于长波红外光学系统。Si 是最便宜的红外材料,且密度较低(2.329g/cm^3),因此有利于降低红外光学系统的制备成本以及整体重量,但是由于 Si 材料具有较高的硬度,所以基于 Si 材料的镜片加工较为困难。此外,Si 材料在超过 $7\mu\text{m}$ 时红外透过率较低,因此与氟化物一样不适用于长波红外波段。Ge、ZnS、ZnSe 是目前流行的红外光学材料,在各个红外波段均具有良好的透过率和较好的化学稳定性。Ge 材料也是折射率较高的红外材料之一,因此很多结构简单的红外光学系统可以使用较少片数的 Ge 镜片获得较好的成像质量。但是 Ge 材料的折射率温度系数较大,由它制作的镜片在温度变化大的环境中使用可能出现严重的热差问题。此外 Ge 的密度(5.323g/cm^3)较高,在设计对重量有限的红外光学系统时需要考虑选用更轻质的材料。ZnS、ZnSe 和 Ge 一样在各个红外波段也具有良好的透过率,甚至在局部可见光和近红外波段也具有一定的透过率。光学等级 ZnS、ZnSe 需要采用化学气相沉淀法(CVD)制备,难以降低制作红外光学系统所需的时间和经济成本。

正因为现有的红外材料在相关性能方面存在各种各样的缺点,所以人们始终没有停止过对新型红外光学材料的探索和研究工作。近年来,硫系玻璃在红外光学领域的应用引起了人们的兴趣。硫系玻璃不仅在短波、中波、长波三个红外波段均具有良好的透过率,而且它的折射率温度系数较低,折射率/色散参数选择较为丰富,并且化学稳定性较好,制备成本较低,因此越来越受到人们的重视。除此之外,随着一些实际应用领域对红外系统像质要求的日益提升,红外成像系统中的特殊面形镜片(包括衍射面和非球面镜片)的使用也越来越广泛。常规的单点金刚石车削技术逐渐无法满足特殊面形镜片的批量生产任务,高精度模压制备技术开始成为高品质红外量产镜片的主要制备技术,如图 5.11 所示为镜片模压成型的工艺流程,如图 5.12 所示为硫系玻璃精密模压过程示意图。硫系玻璃镜片的制造公差包括面形精度(PV)(μm)、粗糙度(R_a)(nm)、倾斜(arcmin)、偏心(μm)、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的透过率等。

随着硫系玻璃镜片(透镜)尺寸增大,精密模压的技术难度呈非线性增长(可模压成型的硫系玻璃透镜最大口径已达 $\Phi 60\text{mm}$,甚至更大)。

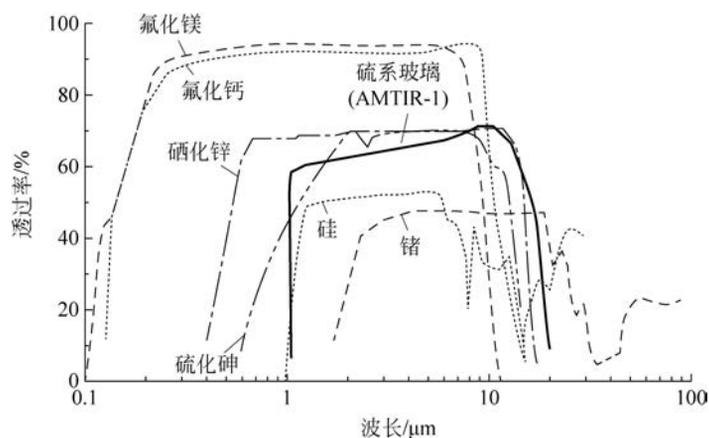


图 5.10 多种常见红外光学材料的透过光谱图

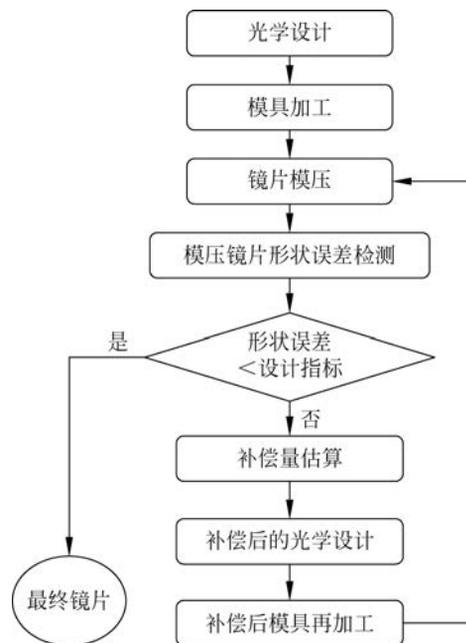


图 5.11 镜片模压成型的工艺流程

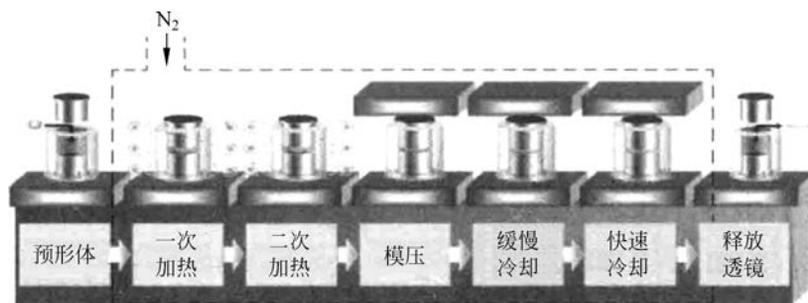


图 5.12 硫系玻璃精密模压过程示意图

晶体态的 Ge、ZnS、ZnSe 具有较高的熔点(分别为 938.25°C 、 1185°C 和 1525°C),并且在达到熔点时直接由固态转变液态,因此模压工艺难以实施。相反,硫系玻璃则以玻璃态存在,没有固定的熔点。随着温度的升高,硫系玻璃呈现一种逐渐软化的状态,在较低温度下即可实施镜片的模压工艺。相比于常规红外材料,硫系玻璃在多项与红外光学设计相关的性能参数上有所提升,并且还具有制备成本低、符合量产模压镜片的工艺特点等优势,因此近年来在红外系统中得到越来越多的应用。

成型能力是硫系玻璃一项重要的性能,与 Ge、ZnS、ZnSe 和 Si 基材料等更常见的红外材料形成鲜明对比。这些更常见的材料具有晶体结构,在 SWIR、MWIR 和 LWIR 波长下表现出色,确实具有一些优势。例如,Ge 透镜往往是类金刚石镀层的优选基材;另外,它的高折射率倾向于使其自身具有较短的光路。ZnS 的透射范围非常广,从可见光谱到约 $19\mu\text{m}$ 。然而,这些材料必须以接近最终用户所需形状的形式生产,或者需要将它们研磨和抛光成最终形状,一般会浪费大量时间。

对于 Ge 单晶、ZnSe 单晶和硫系玻璃这三种红外透镜材料,其相关材料特性如表 5.2 所示。总体上

从材料性质看,三种材料各具优劣,但硫系玻璃与红外晶体材料的一个重要差别在于前者为非晶态,而后者为晶态。晶体材料在加热至熔点时直接由固态转变为液态,无法进行模压加工。而玻璃材料与塑料相似,在加热过程中黏度逐渐降低,直至最佳黏度范围,能按照模具提供的形状通过压制精确成型。镜片模压成型是硫系光学玻璃的优势之一,能大大降低光学镜片加工成本。因此,在民用市场快速增长导致低成本红外透镜元件需求急剧扩大的情况下,尤其是车载夜视等民用系统的发展,精密模压硫系镜片已成为在热成像系统中取代晶体镜片的优质红外光学材料。

表 5.2 热成像用几种红外透镜材料特性比较

红外材料	透过范围/ μm	$dn/dT/(10^{-6}\text{K}^{-1})$	最大口径/mm	资源利用情况	制备加工成本
Ge 单晶	1.8~25	~450	~ $\phi 380$	锗稀散资源消耗高、成本高	单点金刚石车削加工,效率低、成本高
ZnSe 晶体	0.5~20	~6	~ $\phi 82$	无锗资源消耗	单点金刚石车削加工,效率低、成本高
硫系玻璃 (Se 基)	1.1~16	50~90	~ $\phi 240$	锗资源消耗少	精密模压镜片成型制造和加工成本低

5.3.3 红外热成像系统性能评价的常用指标

红外热成像系统总体性能评价的常用指标有噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD)、最小可探测温差 (Minimum Detectable Temperature Difference, MDTD), 以及调制传递函数 (MTF)、作用距离等, 这里介绍前三个常用的重要指标。

1. 噪声等效温差

NETD 定义: 一个扩展目标处于均匀背景中, 当系统扫描使基准电子滤波器输出产生的峰值信号电压 V_s 等于系统均方根噪声电压 V_N 时, 目标与背景的温差为 ΔT 。其表达式为

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{V_s/V_N} \quad (5.1)$$

对于受探测器噪声电压限制的热成像系统, 其噪声等效温差为

$$\text{NETD} = \frac{4F^2(\Delta f_n)^{1/2}}{\pi A_d^{1/2} n_s^{1/2} \tau_a \tau_o \int_{\Delta\lambda} D_\lambda^*(f_1) L'_{\lambda T} d\lambda} \quad (5.2)$$

式中, F 为光学系统的 F 数; A_d 为探测器面积 (cm^2); τ_a 为在 $\Delta\lambda$ 光谱带内平均大气透过率; τ_o 为在 $\Delta\lambda$ 光谱带内光学系统的平均透过率; $L'_{\lambda T}$ 为在波长 λ 和等效背景辐射温度 T 时, 光谱辐射亮度对温度的微商 ($\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{rad} \cdot \mu\text{m})$), $L'_{\lambda T} = \pi^{-1} \cdot \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T}$, $M(\lambda, T)$ 为 (黑体) 目标的光谱辐出度; $D_\lambda^*(f_1)$ 为信号频率 f_1 时, 探测器的光谱探测率 ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$); n_s 为 (串扫) 探测元数; Δf_n 为基准滤波器的等效噪声带宽。

在背景限制光子探测条件下, 系统的噪声等效温差为

$$\text{NETD} = \frac{2F(\Delta f_n)^{1/2}}{\pi A_d^{1/2} n_s^{1/2} \eta_{cs}^{1/2} \eta_q^{1/2} \tau_a \tau_o \int_{\Delta\lambda} D_\lambda^{**}(f_1) L'_{\lambda T} d\lambda} \quad (5.3)$$

式中, η_{cs} 为冷屏效率; η_q 为探测器量子效率; $D_\lambda^{**}(f_1)$ 为具有 2π 立体角 (半球) 视场的探测器的探测

率,且

$$D_{\lambda}^*(f_1) = 2F\eta_{cs}^{1/2}\eta_q^{1/2}D_{\lambda}^{**}(f_1) \quad (5.4)$$

2. 最小可分辨温差

MRTD的定义:具有不同空间频率,高宽比为7:1的四杆状目标处于均匀背景中,如图5.13所示,目标与背景的温差从零逐渐增大,在确定的空间频率下,观察者刚好能分辨出四杆状图形时,目标与背景的等效黑体温差。

当探测概率为90%,取探测一线条的阈值显示信噪比 $SNR_{DT}=4.5$ 时,MRTD的一般表达式为

$$MRTD = 3 \frac{NETD}{MTF_s} f_T \left\{ \frac{\alpha\beta}{T_e \dot{F} \tau_d \Delta f_n} \right\}^{1/2} \quad (5.5)$$

式中, MTF_s 为不包括显示器在内的系统的MTF; f_T 为空间频率(lp/mm); T_e 为人眼的积分时间(s); \dot{F} 为帧频(Hz); τ_d 为探测器驻留时间; α 、 β 为探测器的水平、垂直瞬时视场。

3. 最小可探测温差

MRTD是实验室评价热像仪性能的重要函数,但不能表征实际探测目标的性能水平,引入最小可探测温差可用来表征受噪声限制的野外探测性能。它被定义为观察者恰能发现处于大面积均匀背景中的方形或圆形目标时所需的黑体温差,它是目标大小的函数。

MDTD的计算公式为

$$MDTD(f_T) = \sqrt{2} SNR_{DT} \left(\frac{NETD}{I(x,y)} \right) \left(\frac{f_T \beta Q(f_T)}{T_e \dot{F} \Delta f_n} \right)^{1/2} \quad (5.6)$$

式中, SNR_{DT} 为阈值显示信噪比; $Q(f_T)$ 为噪声滤波函数; $I(x,y)$ 是归一化为单位振幅的方形目标的像,即像分布函数的傅里叶变换,对于比探测器立体角小得多的目标, $I(x,y)$ 为目标立体张角与探测器立体张角之比。

$$Q(f_T) = \int_0^{\infty} g^2(f_T) H_e(f_T) H_m(f_T) H_{ey}(f_T) df_T \quad (5.7)$$

式中, $g(f_T)$ 为噪声频谱; $H_e(f_T)$ 、 $H_m(f_T)$ 、 $H_{ey}(f_T)$ 分别为电路系统、显示器和人眼的MTF。

5.3.4 凝视成像系统的优点

过去使用的单元扫描成像方法不适合制作更高级的红外成像系统,即使使用一维线阵探测器也受到限制。首先是线阵探测器仍需采用二维扫描,使系统结构复杂,而凝视型焦平面阵列由于取消了光机扫描机构,减小了体积和质量,结构紧凑;其次,凝视型焦平面的探测器单元有较长的积分时间,因而有更高的灵敏度。

此外,与扫描型系统相比,凝视型焦平面还具备以下优点。

1) 提高了信噪比和热灵敏度

设单个探测器对视场扫描的驻留时间为

$$\tau_{cs} = \frac{\eta_s \alpha \beta}{ABF'} \quad (5.8)$$

式中, η_s 为扫描效率, α 、 β 分别为水平和垂直方向上的瞬时视场, A 、 B 分别为水平和垂直方向上的总视场, F' 为取像效率。



图 5.13 用于 MRTD 测定的目标

相应的信号通道频带宽度为

$$\Delta f_{is} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\tau_{cs}} = \frac{\pi}{4} \frac{ABF'}{\eta_s \alpha \beta} \quad (5.9)$$

若使用 $n_h \times n_v$ 个探测器单元,则驻留时间为

$$\tau = n_h n_v \tau_{cs} \quad (5.10)$$

频带宽度为

$$\Delta f = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{1}{n_h n_v} \Delta f_{is} \quad (5.11)$$

由于系统的信噪比与频带宽度的平方根成反比,所以,由 $n_h \times n_v$ 个探测器构成的系统信噪比为单个探测器的 $(n_h n_v)^{1/2}$ 倍。另外,扫描系统的热灵敏度公式为

$$(\text{NETD})_{si} = k \frac{F^2}{A_d^{1/2} \tau_o D_p^*} \left(\frac{ABF'}{\alpha \beta \eta_s} \right)^{1/2} \quad (5.12)$$

式中, F 为系统的相对孔径; A_d 为探测器敏感面积; τ_o 为光学系统透过率; D_p^* 为探测器峰值探测率; k 为常数,与工作波长范围、背景及目标温度有关。

凝视系统的热灵敏度公式为

$$(\text{NETD})_{si} = k \frac{F^2}{A_d^{1/2} \tau_o D_p^*} \left(\frac{F'}{n_h \times n_v} \right)^{1/2} \quad (5.13)$$

式中, $n_h = A / (\eta_h \alpha)$, $n_v = B / (\eta_v \beta)$; $\eta_s = \eta_h \times \eta_v$, η_h 、 η_v 分别为水平和垂直方向的扫描效率。

从式(5.12)和式(5.13)看出,当系统参数相同时,凝视型红外系统的灵敏度为扫描型系统的 $n_h n_v$ 倍。提高信噪比和灵敏度,就提高了整个红外系统的性能。

2) 最大限度地发挥探测器的快速性能

在达到相同的扫描频率时,凝视型比扫描型对探测器的响应速度要求低。设扫描一帧包括 N 个分辨元的图像,探测器为 n 元的列阵,每个探测器扫过 N/n 个分辨元,则探测器的驻留时间为

$$\tau = n \times \frac{T_F}{N} \times \eta_s \quad (5.14)$$

式中, T_F 为帧周期; η_s 为扫描效率。

例如: $T_F = (1/20)\text{s}$, $N = 500$ 像元 \times 500 像元,假定扫描效率为 100%,则单元探测器扫描的驻留时间为 $0.2\mu\text{s}$ 。而对 $n = 100$ 元 \times 100 元的探测器,驻留时间增加到 $2000\mu\text{s}$,大大降低了探测器的响应速度;另外,当探测器的响应速度相同时,凝视型的扫描速度为扫描型的 n 倍。即驻留时间 $\tau = 0.2\mu\text{s}$ 时,单个探测器的帧周期为 $(1/20)\text{s}$;而 $n = 100$ 元 \times 100 元的探测器的帧周期 $T_F = (1/200\,000)\text{s}$,提高扫描速度近一万倍。

由于凝视型成像极大地提高了系统的快速响应能力,使目标图像能随目标机动变化,这对于红外成像跟踪系统是非常重要的。

3) 简化信号处理,提高可靠性

由于红外焦平面列阵本身具有多路到单路的信号传输功能,所以凝视型系统简化了信号处理和信号读出电路,提高了可靠性。在红外成像导引头信号处理中,可采用体积小、质量轻、运算速度快、软件固化灵活等优点的高速单片机来完成图像信号的读出与处理。

4) 可以批量生产,易于形成规模

由于凝视系统不需要机械扫描,因此生产步骤简化,可以省略调校、加工等复杂环节。凝视红外焦平面可以集成为一块电路板,适于大批量生产。

5.4 IRFPA 非均匀性产生的原因及其校正技术

近几十年无论在军事上还是在商业领域,红外成像技术都获得了突飞猛进的发展,其中红外焦平面探测器的应用是一个关键的因素。IRFPA 器件是一种辐射敏感和信息处理功能兼备的新一代红外探测器,是当今技术性能最先进的红外探测器,相比传统的光机扫描红外成像系统,用它构成的红外成像系统具有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高、噪声等效温差小等优点。但 IRFPA 器件由于受探测器材料和工艺水平所限,也存有其弱点——非均匀性问题,正是由于非均匀性问题的存在又限制了红外凝视成像系统的探测性能。FPA 成像的非均匀性是指焦平面在均匀辐射输入时各单元输出的不一致性,又称为固有空间噪声。

由于制造和使用环境的影响,也就是说由于量子效率差异、光谱响应差异、各个像元暗电流的差异、像元视场角的差异、读出电路输入级零点偏移不均匀、读出电路 A/D 非线性和焦平面工作温度稳定性的影响,使得图像的非均匀性成为制约红外焦平面探测器性能的限制性因素。其中,像元线性度(包括读出电路)是关键因素之一,敏感材料本身的均匀性也是十分重要的。

一般意义上的非均匀性是指由探测器各阵列的红外响应度不一致而导致的像质降低。更一般意义上的非均匀性还包括由 FPA 所处环境温度的变化,电荷传输效率以及 $1/f$ 噪声等诸多因素所造成的成像质量的下降。红外图像的非均匀性严重影响着红外传感器的成像质量,因此,必须进行红外非均匀性校正(Non-uniformity Correction, NUC)。

探讨红外成像非均匀性的来源及其表现形式对于 NUC 是十分重要的。通过对非均匀性来源的分析,探讨其成因,以利于校正算法的研究。非均匀性的主要来源及表现形式如下:

(1) 探测器中各阵列元的响应特性不一致。这种不一致是由制造过程中的随机性所引起的,如 FPA 各探测元有效感应面积的不同以及半导体掺杂的变化等原因,其表现为信号乘性和加性的变化。当阵列具有较高的稳定性时,这种非均匀性在像平面上的模式是固定的。

(2) $1/f$ 噪声。虽然目前对 $1/f$ 噪声的成因尚未完全清楚,但通常认为它是由半导体的表面电流所引起的。不同的阵列元内部的 $1/f$ 噪声可以近似地认为彼此互不相关。 $1/f$ 噪声为一非平稳随机过程。

(3) 电荷传输效率。这种非均匀性存在于采用移位读出的 FPA 中,表现为图像平面上的阴影,随像素点与阵列读出节点的距离作指数变化,距离越大,亮度越暗。通常也表现为固定的乘性噪声。

(4) 红外光学系统的影响。如镜头的加工精度、孔径的影响等因素,它表现为固定的乘性噪声。当孔径的中轴和光轴重合时,表现为中间亮、四周暗。

(5) 无效探测阵列元的影响。在焦平面上,有少量的阵列敏感元对红外辐射的响应很弱或几乎不响应,这些阵列元在图像上一直表现为黑点。

(6) FPA 所处环境的温度变化。温度的变化将对所有的阵列元起作用,温度的变化是随机的。

从上面的分析可以看出,红外非均匀性表现为乘性和加性噪声,并且噪声会随时间发生变化,NUC 的目的即是要消除以上因素的影响,提高图像质量。

虽然造成红外焦平面探测器成像的非均匀性的原因有很多,但总的可分为两类:一类是与探测器本身性能有关;另一类是与探测器本身无关。对于第一类因素比较容易校正,而对第二类因素却很难校正。正是红外焦平面探测器成像非均匀性的复杂特点,增加了对它校正的难度,至今红外焦平面探测器成像的 NUC 主要集中在对第一类因素的校正上。

目前常用、有效且易行的校正方法有单点温度校正法(单点法)、两点温度校正法(两点法)和多点温

度校正法(多点法)。NUC方法采用较多的是两点校正法,即假定探测元的响应特性在所感兴趣的温度范围内是线性的,实际情况并非完全如此。为弥补两点校正方法的不足,可进一步采用多个温度点进行多点校正。但由于FPA响应特性的时间性及有些情况下辐射体温度的不可预知性,NUC应随环境的变化作自适应调整。但是,由于现在阵列的像元数越来越多,多点校正需要的数据量相当庞大,所以实际工作中多点法还没有普遍采用。

对于最关心红外目标的情况(如未制导),至于背景杂波的模糊和淡化对后续的检测还是十分有利的因素,因而采用高通滤波校正方法具有较好的应用效果。

另外,通过分析可以得到,高通滤波校正方法一般具有以下特点:

(1) 高通滤波的结果保留在图像平面中不断移动的物体上,包括不断抖动的斑点目标、云层的边缘以及时域上的高频噪声。

(2) 高通滤波校正方法要求目标在像平面上处于不断地移动之中,这样才能保证目标不至于被滤除。

(3) 每个像素点的滤波都是彼此独立的,因此高通滤波校正方法易于硬件并行实现。

值得一提的是,利用人工神经网络方法进行红外焦平面非均匀性自动校正是一种有前途的技术手段。

具体来说,探测器NUC的常用方法主要有两点温度校正法、恒定统计平均法、时域高通滤波法和人工神经网络法。这些方法可以分为两类:即线性校正和非线性校正,其中前两种属于线性校正技术,后两种属于非线性校正技术。线性校正相对非线性校正来说技术上较为成熟。此外,后来国内外又研究提出了基于场景的代数算法、基于干扰抵消原理的自适应校正法和基于低次插值的多点校正算法等。

5.4.1 红外焦平面非均匀性产生的原因

红外焦平面非均匀性产生的主要原因如下:

1. 器件本身的非均匀性

器件本身的非均匀性是红外图像非均匀性的主要产生原因。以MCT光伏探测器/CCD混合FPA结构为例,它的非均匀性主要由红外探测器、CCD及探测器与CCD的相互耦合三方面的原因组成,它们主要由器件的材料及其制造工艺水平所决定。一旦IRFPA器件制造完成,由这种制造工艺产生的非均匀性因素将始终存在。

红外探测器方面的原因可分为:基底材料的非均匀性、探测器面积的差异、光谱响应的变化、探测器掺杂水平的波动、探测器偏置电压以及其他一些制造因素。国内外研究成果表明: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料中的 x 组分的变化和 CCD 注入效率的变化将影响红外探测器的非均匀性。当组分变化为 0.002 时,中波 IRFPA 有 10% 的固有非均匀性;当注入效率为 90% 时,非均匀性为 20%~22%;当注入效率提高到 99.9% 后,非均匀性最大值降低为 1.7%。

红外探测器的输出信号一般是很微弱的,为有效利用这种信号,必须对探测器采取适当的偏置并且将信号放大。探测器的偏置是指通过偏置电路对探测器加上一定的偏置电压或电流,使探测器在正常的状态下工作,发挥出最好的性能;信号放大是指将一定偏置状态下的探测器与前置放大器耦合,以便将微弱信号的电压幅度或功率予以放大。在当今使用的探测器中,热敏电阻型探测器、外光电探测器和光电导探测器,需要外加偏置电源,这几种探测器需要通过外加电场才能形成光电信号电流或电压。光生伏特探测器可以加正向偏置电压工作,也可以加反向偏置电压工作,其他探测器不需加电源就可以工作。偏置电压的波动和信号放大的不稳定性都将产生红外图像的非均匀性。

CCD 方面的原因主要有: CCD 势阱的不均匀、CCD 传递效率的变化及脉冲电压的波动。CCD 势阱是存储照到探测器上的红外辐射产生的信号电荷,所有 CCD 势阱不可能相同,它的变化将造成红外

探测器成像不均匀。当势阱中产生信号电荷时,用一定相位差的时钟脉冲电压实现势阱间的电荷耦合和转移,因此时钟脉冲电压的变化和 CCD 的传递效率的改变也可造成红外成像的非均匀性。

2. 器件工作状态引入的非均匀性

红外热成像系统的性能中,与焦平面器件工作状态相关的主要参数有:焦平面工作温度波动和温度的非均匀性、CCD 器件单元的驱动信号变化等。光伏探测器的辐射响应性能与它所处的实际温度相关,焦平面器件和探测单元的温度均匀性变化将影响整个器件响应率的均匀性。同样,CCD 器件单元驱动信号的变化也将对器件的响应率有影响。这种非均匀性主要由焦平面器件的工作状态所决定,同一焦平面器件在不同的成像系统中有着不同的非均匀性效果。

3. 与外界输入有关的非均匀性

在红外热成像系统中,目标和背景红外辐射的变化、红外热像仪光学系统辐射等外界特性也可对焦平面器件的非均匀性产生影响。影响红外辐射变化主要有辐射总量和辐射光谱两种形式。由于红外探测器光谱响应变化比较复杂,辐射总量的响应均匀性并不能保证其辐射光谱变化后仍有相同的均匀性。一般在红外探测器的敏感元件前有光学部件(或称光学系统),用来获取被测目标的红外辐射,并将其聚焦于敏感元件表面上。由于各探测器离开光学系统光轴的夹角不同,使相同面积的探测器实际得到的红外辐射产生差异,从而导致红外成像的非均匀性。红外光学系统的背景辐射条件的变化将直接影响到红外探测器所处的工作环境、工作参数和工作性能。

这类非均匀性与实际外界条件密切相关,在焦平面器件的研制和红外热成像的设计中很难直接观察到。

如果把红外热成像系统看成是图像色彩的变换系统,则人们可从实际红外成像系统的图像信息传递过程去分析图像非均匀性的产生机理和变化形态,但要获得完整的分析结果将是很困难的,因为在红外图像的传递过程中许多非均匀性因素是相互耦合并以综合形态表现出来的。

在完整的红外图像非均匀性产生机理和分析理论确立以前,采用实际测量方法是人们分析红外图像非均匀性的一种有效手段。测试采用标准黑体辐射源,通过比较红外热成像系统的输入与输出图像的均匀性来获得对被测器件或系统的总体认识。

5.4.2 红外焦平面 NUC 方法

红外焦平面 NUC 方法有许多,这里仅介绍两点温度校正法、恒定统计平均法、时域高通滤波法和人工神经网络法。值得一提的是,由于各种算法层出不穷,应针对具体对象和应用场合,提出或选择采用相应的算法。

1. 两点温度校正法

从红外图像非均匀性的来源和表现形式可以看出,如果各阵列元的响应特性在所感兴趣的温度范围内为线性、在时间上稳定、并假定 $1/f$ 噪声的影响较小,则非均匀性引入固定模式的乘性和加性噪声。在此条件下,FPA 探测器中第 (i, j) 个阵列元的响应输出为

$$P(i, j, \phi) = R_{i,j} \phi_s + O_{i,j} \quad (5.15)$$

式中, (i, j) 是探测器在阵列上的坐标, ϕ_s 是入射到探测器的光子流, $R_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 分别为增益和偏移量。

对应于高低参考辐射源的红外焦平面探测器的响应为

$$P(i, j, \phi_L) = R_{i,j} \phi_L + O_{i,j} \quad (5.16)$$

$$P(i, j, \phi_H) = R_{i,j} \phi_H + O_{i,j} \quad (5.17)$$

式中, ϕ_L 和 ϕ_H 分别为对应于场景高低端温度定标辐射通量。由式(5.16)和式(5.17)得

$$R_{i,j} = \frac{P(i,j,\phi_L) - P(i,j,\phi_H)}{\phi_L - \phi_H} \quad (5.18)$$

ϕ_L 和 ϕ_H 是温度的非线性函数。即使用黑体进行温度定标,也很难确定探测器上的 ϕ_L 和 ϕ_H ,因此很难计算 $R_{i,j}$,为此最好从方程中消除 ϕ_L 和 ϕ_H 。如果定义所有像素的空间平均量为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(i,j)}{N \times M} \quad (5.19)$$

式中, $N \times M$ 为探测器阵列的尺寸。对于 ϕ_L 和 ϕ_H 阵列平均响应度为

$$\bar{R} = \frac{\bar{P}(\phi_L) - \bar{P}(\phi_H)}{\phi_L - \phi_H} \quad (5.20)$$

由式(5.18)~式(5.20)得增益系数:

$$\frac{\bar{R}}{R_{i,j}} = \frac{\bar{P}(\phi_L) - \bar{P}(\phi_H)}{P(i,j,\phi_L) - P(i,j,\phi_H)} \quad (5.21)$$

式(5.21)中所有参数已知,并且可以算出每像素的 $\frac{\bar{R}}{R_{i,j}}$,目的是用平均响应度表示所有像素,用 ϕ_L 量把偏移量在平均值中表示出来。

$P(i,j,\phi)$ 表示任意温度(在高低温度间)任意未校正像素 (i,j) 的响应,它减去低端温度时的偏移,获得偏移校正,然后乘以增益系数实现增益校正,最后加上所有像素在低端温度时响应的平均值(为避免辐射信息丢失),得到校正后的像素响应:

$$\begin{aligned} P_c(i,j,\phi) &= [P(i,j,\phi) - P(i,j,\phi_L)] \frac{\bar{R}}{R_{i,j}} + \bar{P}(\phi_L) \\ &= [P(i,j,\phi) - P(i,j,\phi_L)] m_{i,j} + \bar{P}(\phi_L) \end{aligned} \quad (5.22)$$

式中, $m_{i,j}$ 为增益/响应度因子,式(5.22)可以改写为

$$P_c(i,j,\phi) = P(i,j,\phi) m_{i,j} + [\bar{P}(\phi_L) - P(i,j,\phi_L) m_{i,j}] \quad (5.23)$$

$m_{i,j}$ 和 $[\bar{P}(\phi_L) - P(i,j,\phi_L) m_{i,j}]$ 需要重新计算并存在增益和偏移量的存储器中。在实际当中每一探测单元的计算包括一次乘积和一次加法运算。

2. 恒定统计平均法

恒定统计平均法建立在如下假设之上:每个探测器单元的输出信号的统计平均值是恒定的;输入每个探测器单元的输入信号 $x(t)$ 的统计方差都相等。待测输出 $y(t)$ ($y(t) = ax(t) + b$) 的平均值和方差可由下面的公式得到:

$$m_y = E[y] = E[ax + b] = aE[x] + b = am_x + b \quad (5.24)$$

$$\delta_y^2 = \text{Var}[y] = \text{Var}[ax + b] = a^2 \delta_x^2 \quad (5.25)$$

为了不失一般性,假定 $E[x] = 0$ 和 $\delta_x^2 = 1$,则得每像素的未知变量 a 和 b 分别为

$$b = E[y] = m_y \quad (5.26)$$

$$a = \delta_y \quad (5.27)$$

标准偏移量为

$$s_y = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t) - m_y| dt = \frac{1}{T} \int_0^T |ax(t)| dt = as_x \quad (5.28)$$

增益因子为

$$a = \frac{s_y}{s_x} \quad (5.29)$$

对于每个探测器的参数 δ_x 和 s_x 都相同,都作为一个比例因子,单位变量信号可由下面偏移归一化方程得到:

$$x = \frac{y - m_y}{s_y} \quad (5.30)$$

采用下列方程估计非连续信号的平均和标准偏移量:

$$\hat{m}_y(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y(k) \quad (5.31)$$

$$\hat{s}_y(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y(k) - \hat{m}_y(k)| \quad (5.32)$$

为了减少计算,上式可改为

$$\hat{m}_y(n) = \frac{y(n) + (n-1)\hat{m}_y(n-1)}{n} \quad (5.33)$$

$$\hat{s}_y(n) = \frac{|y(n) - \hat{m}_y(n)| + (n-1)\hat{s}_y(n-1)}{n} \quad (5.34)$$

使用这种方法,每个探测器每一步只需四次乘法/除法和四次加法/减法运算。国外针对恒定统计平均法进行了专用模拟芯片的研究,提出了另一种更接近实际的线性模型:

$$y = ax + b + n' \quad (5.35)$$

相对于 $y(t) = ax(t) + b$ 增加了相应的噪声项 n' ,并提出了使用 Wiener 滤波方法估计增益和偏移因子的方法。理论上,这种方法优于恒定统计平均法,但其计算复杂,不适合实际系统使用。

3. 时域高通滤波法

阵列单元的响应特性随时间的缓慢变化和阵列元内部的 $1/f$ 噪声集中在低频部分。目标相对于背景杂波在像面上有较大的运动速度,因此目标信号具有相当的高频能量;而背景杂波,如云层等因素在像平面上的移动速度很小或相对静止,因而表现为低频分量。因此,采用高通滤波器方法可以在实现 NUC 的同时达到突出目标的目的。其原理如图 5.14 所示(假设增益为 1)。

图 5.14 中,

$$y(n) = x(n) - f(n) \quad (5.36)$$

低通采样输出为

$$f(n) = x(n)/N + (1 - 1/N)f(n-1) \quad (5.37)$$

式中, N 为设置的帧数。可以先假设某像素在第 n 帧经校正后得到一个滤波器输入量 $x(n)$,经过无限冲击响应滤波器(IIR-DF)低通滤波后,得到了低通滤波输出 $f(n)$,再通过减法运算,得到一个高通滤波输出 $y(n)$ 。经 z 变换,得到传递函数为

$$H(z) = Y(z)/X(z) = \frac{(N-1)(z-1)}{Nz - (N-1)} \quad (5.38)$$



图 5.14 时域高通滤波法原理图

这种方法抑制了 $1/f$ 噪声对图像的 NUC 影响,克服了基于参照元校正存储大的问题,但也要求探测器响应率有较好的线性。

4. 人工神经网络法

可以不对 FPA 进行定标(或自动定标)是红外成像系统的理想情况。依赖于神经网络方法,自适应地进行校正系数的更新是其研究的热点内容之一。

具体方法是:让每个神经元连接一个阵列元,再设计一个隐含层,它的每个神经元就像水平细胞元那样与邻近几个阵列元连接起来,得到它们的平均输出值,反馈到其上层神经元,计算非均匀性;采用最陡下降法,依据实际景像逐帧迭代,直到最佳状态,如图 5.15 所示。过程如下:

1) 计算邻域平均值

计算邻域平均值:

$$x_{ij} = \frac{x_{(i-1,j)} + x_{(i,j-1)} + x_{(i+1,j)} + x_{(i,j+1)}}{4} \quad (5.39)$$

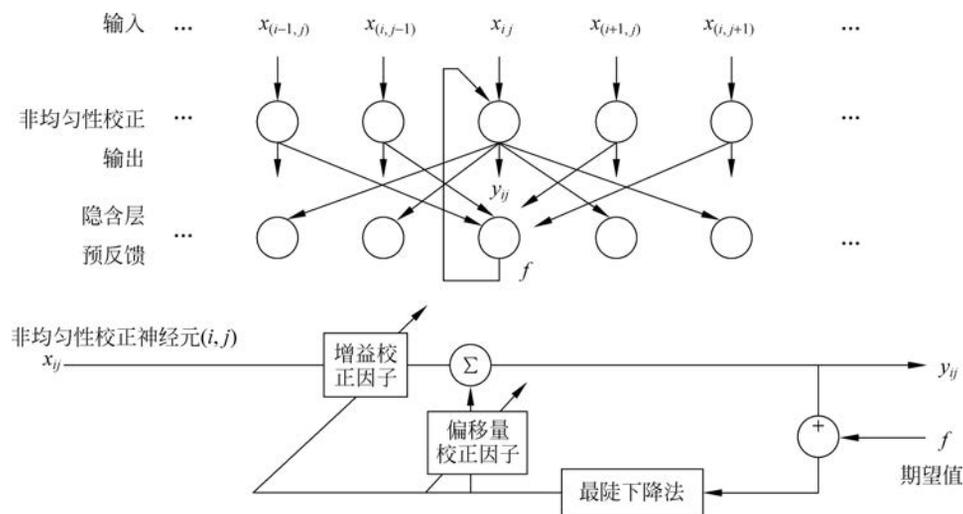


图 5.15 人工神经网络法原理图

2) 计算增益校正因子和偏移量校正因子

令 $y = Gx + O$, 其中 G 为增益校正因子, O 为偏移量校正因子。误差函数为

$$F(G, O) = (Gx + O - f)^2 \quad (5.40)$$

利用此函数的梯度函数和最陡下降法,可以得到计算 G 和 O 的迭代公式:

$$G_{n+1} = G_n - 2ax(y - f) \quad (5.41)$$

$$O_{n+1} = O_n - 2ax(y - f) \quad (5.42)$$

式中, a 为下降步长, n 为帧数。

3) 计算 y_{n+1}

利用线性校正算法,计算:

$$y_{n+1} = G_{n+1} \times x_{n+1} + O_{n+1} \quad (5.43)$$

可见,神经网络方法在理论上无须对 FPA 进行定标,校正系数可以连续更新,对探测器参数的线性和稳定性要求不高,但研究工作量大,应用时计算量大,需要特殊并行计算机结构来实现。

5.4.3 四种算法的优点和缺点

两点温度校正法精度低、动态范围小,特别是当 IRFPA 各探测器单元响应的非线性比较突出时,校正效果显著变差。但是两点温度校正法适合于所有类型的红外图像 NUC,被广泛应用于军事上和商业领域。其他几种方法虽然在一定范围内精度较高,但由于适用性小,一般用在特殊领域。四种方法的优缺点对比如表 5.3 所示。

表 5.3 四种校正方法的优点和缺点

方 法	优 点	缺 点
两点温度校正法	算法简单;实时工作;不需要场景运动,也适用于静止景物的观测	需要用参考黑体源先进行初始定标;长时间工作后,需要重新定标;由于像素的漂移和非线性,空间噪声大于时间噪声;需要附加设备
恒定统计平均法	不需要初始定标;在低时间噪声情况下,方法简单、可靠、易实现,信噪比高;空间噪声能降低到接近时间噪声水平	这种方法收敛性差,许多情况下不易实现
时域高通滤波法	不需要初始定标;实时工作;方法简单;使用适当的时间常数能使空间噪声降低到时间噪声水平;本身具有滤掉低频噪声和渐晕效应的能力	只能用于偏移校正,因此必须有良好的增益均匀性;需要场景运动或探测器运动,否则将图像衰减;对于较小的时间常数,会出现像阴影,有时可能出现信号和场景内容的轻度丢失
人工神经网络法	不需要初始定标;空间噪声能降低到接近时间噪声水平;背景改变时可以跟踪像素的非均匀性;在相对短的周期内可以连续更新增益和偏移量	实时工作需要先进的多处理结构;要求场景运动或探测器运动否则会出现像模糊;网络稳定性问题需要更多的试验去验证其原理的正确性

用可见光 CCD 相机采集 128×128 像元、64 灰度水平的图像,在各像元点加入不同的增益和偏移系数模拟红外 CCD 相机采集的图像,利用上述四种方法进行校正计算,如图 5.16~图 5.21 所示。



图 5.16 原始图像



图 5.17 仿真图像



图 5.18 两点温度校正法校正图像



图 5.19 时域高通滤波法校正图像



图 5.20 恒定统计平均法校正图像



图 5.21 人工神经网络法校正图像

5.4.4 三种新算法

这里介绍三种新的红外焦平面 NUC 方法: 基于场景的代数算法、基于干扰抵消原理的自适应校正方法和基于低次插值的 IRFPA 非均匀性多点校正算法。

1. 基于场景的代数算法

基于场景的代数算法具体如下:

1) 原理

考虑由一个 FPA 探测器产生的 $M \times N$ 像序列 $y_n (n=1, 2, \dots)$ 表示帧数。焦平面探测器输出的线性模式为

$$y_n(i, j) = a(i, j)z_n(i, j) + b(i, j) \quad (5.44)$$

式中, $z_n(i, j)$ 为帧时间内对探测器有效面积积分的辐射通量, $a(i, j)$ 和 $b(i, j)$ 分别为探测器的增益和偏移量。在多数探测器当中, 由于偏移非均匀性占主要地位, 增益非均匀性可以忽略, 假设所有探测器的增益相同且为 1, 因此式(5.44)可简化为

$$y_n(i, j) = z_n(i, j) + b(i, j) \quad (5.45)$$

为了方便, $M \times N$ 探测器的偏移非均匀性矩阵 \mathbf{B} 定义为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \\ b(2,1) & b(2,2) & \cdots & b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(M,1) & b(M,2) & \cdots & b(M,N) \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

假定在帧时间内被观测的物体温度恒定, 可用内插法对与第 n 帧相邻两帧场景模拟出第 $(n+1)$ 帧场景。为了简单方便, 选择线性内插法。对于出现 α 个像素纯垂直亚像素偏移的相邻两帧场景, 第 k 帧场景和第 $k+1$ 帧场景间的像素数关系为

$$y_{k+1}(i+1, j) = \alpha z_k(i, j) + (1-\alpha)z_k(i+1, j) + b(i+1, j), \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (5.47)$$

同样, 对于出现 β 个像素纯水平亚像素偏移的相邻两帧场景, 第 m 帧场景和第 $m+1$ 帧场景间的像素数关系为

$$y_{m+1}(i, j+1) = \beta z_m(i, j) + (1-\beta)z_m(i, j+1) + b(i, j+1), \quad 0 < \beta \leq 1 \quad (5.48)$$

规定: α 正号表示场景向下运动, β 正号表示向左运动。原理就是把一个探测单元的偏移值转换为它的垂直相邻的探测单元的偏移值, 把整个一列探测器的偏移归化为统一的数值, 同理对所有列和行进行如此处理, 最终把阵列上所有的偏移归化为统一的数值。

2) 算法

对于探测器 B 定义 α 个像素偏移中间校正矩阵为 $\tilde{\mathbf{V}}_B$: 当 $j=1, 2, \dots, N$ 时, 令 $\tilde{\mathbf{V}}_B(1, j)=0$, 定义

$$\tilde{\mathbf{V}}_B(i, j) = \frac{1}{\alpha} [\alpha y_n(i-1, j) + (1-\alpha)y_n(i, j) - y_{n+1}(i, j)] \quad (5.49)$$

式中, $i=2, 3, \dots, M, j=1, 2, \dots, N, M \times N$ 为帧图像的尺寸。将 $y_k(i-1, j), y_k(i, j)$ 和 $y_{k+1}(i, j)$ 代入式(5.49)可得

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{V}}_B(i, j) &= \frac{1}{\alpha} [\alpha z_B(i-1, j) + \alpha b(i-1, j) + (1-\alpha)z_B(i, j) + (1-\alpha)b(i, j) - \\ &\quad \alpha z_B(i-1, j) - (1-\alpha)z_B(i, j) - b(i, j)] = b(i-1, j) - b(i, j) \end{aligned} \quad (5.50)$$

通过累加每列的 $\tilde{\mathbf{V}}_B$,得到垂直校正矩阵 \mathbf{V}_B 。更确切地说,对于 $i=2,3,\dots,M,j=1,2,\dots,N$,定义垂直校正矩阵 \mathbf{V}_B 的第 (i,j) 单元为 $V_B(i,j)=\sum_{c=2}^i \tilde{\mathbf{V}}_B(c,j)$, \mathbf{V}_B 的矩阵形式为

$$\mathbf{V}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b(1,1) - b(2,1) & b(1,2) - b(2,2) & \cdots & b(1,N) - b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1) - b(M,1) & b(1,2) - b(M,2) & \cdots & b(1,N) - b(M,N) \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

同理,由已校正垂直偏移的探测器的偏移矩阵 $\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \end{bmatrix}$ 得到水平校正矩阵:

$$\mathbf{H}_{B'} = \begin{bmatrix} 0 & b(1,1) - b(1,2) & \cdots & b(1,1) - b(1,N) \\ 0 & b(1,1) - b(1,2) & \cdots & b(1,1) - b(1,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & b(1,1) - b(1,2) & b(1,1) - b(1,3) & b(1,1) - b(1,N) \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

总的校正矩阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{V}_B + \mathbf{H}_{B'} = \begin{bmatrix} 0 & b(1,1) - b(1,2) & \cdots & b(1,1) - b(1,N) \\ b(1,1) - b(2,1) & b(1,1) - b(2,2) & \cdots & b(1,1) - b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1) - b(M,1) & b(1,1) - b(M,2) & \cdots & b(1,1) - b(M,N) \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

在实际计算当中,由于式(5.47)和式(5.48)的线性内插近似的误差以及 α 和 β 偏移估计误差,将导致偏移校正矩阵误差(噪声),为了减少这种噪声的影响,得到两个集合 C_α 和 C_β ,它们分别由不同的 α 和 β 像素偏移的连续两像帧组成。用这两个集合,可以得到许多垂直和水平校正矩阵,形成平均垂直和水平校正矩阵 $\bar{\mathbf{V}}_B$ 和 $\bar{\mathbf{H}}_{B'}$,总校正矩阵为两者之和。

此种方法简单、可靠、容易实现,只需少量的像帧就可获得有效的校正矩阵,在场景辐射分布差异较小时也能有效地实现校正。缺点是只能校正偏移量。

2. 基于干扰抵消原理的自适应校正方法

假定IRFPA在第 n 个时刻的输出为 $x(n)$,它是存在非均匀性的失真图像,由有用信号 $S(n)$ 和噪声 $N_1(n)$ 混合而成: $x(n) = S(n) + N_1(n)$, $S(n)$ 和 $N_1(n)$ 是不相关的。因为产生噪声的复杂性和有用信号的多样性,设计者无法得到它们的先验知识,所以,可以设计用自适应滤波器去抵消噪声。

自适应干扰抵消的基本思想就是对噪声信号进行自适应的估计,然后从输入信号中减去此噪声得到信号的最佳估计。自适应校正方法的原理如图5.22所示。

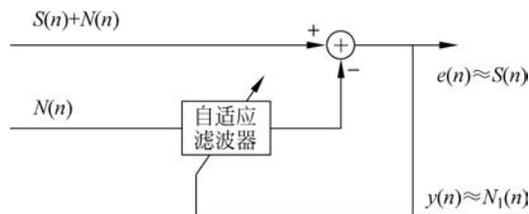


图 5.22 基于干扰抵消原理的自适应校正方法的原理图

图 5.22 中 $N(n)$ 是与 $N_1(n)$ 相关的噪声, 经自适应滤波器后得到 $y(n)$, 则系统的输出为

$$e(n) = S(n) + N_1(n) - y(n) \quad (5.54)$$

为了书写简便, 下面表达式中省去了时间下标 n 。对式(5.54)平方后, 得到

$$e^2 = S^2 + (N_1 - y)^2 + 2S(N_1 - y) \quad (5.55)$$

对此式两边取数学期望, 并考虑到 S 与 N_1 和 N 不相关, 得到

$$E[e^2] = E[S^2] + E[(N_1 - y)^2] \quad (5.56)$$

当自适应调节滤波器使 $E[e^2]$ 最小时, 信号功率 $E[S^2]$ 将不受影响, 也就是自适应滤波器使 $E[(N_1 - y)^2]$ 达到最小。所以, 自适应滤波器的输出 y 即为原始噪声 N_1 的最佳均方估计。又由于 $N_1 - y = e - S$, 因此可知 $E[(N_1 - y)^2]$ 最小时, 也使 $E[(e - S)^2]$ 最小。即 e 是 S 的最佳均方估计, 从而实现了噪声的消除。

3. 基于低次插值的 IRFPA 非均匀性多点校正算法

基于低次插值的 IRFPA 非均匀性多点校正算法具体如下:

1) 多点校正算法原理

根据 IRFPA 器件工作时场景的变化范围, 选定 M 个辐射度 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$ 作为校正定标点, 分别对 IRFPA 中所有 N 个探测单元的输出 $S_j(\varphi_i)$ 求平均, 得:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^N \frac{f[S_j(\varphi_i)]}{N} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (5.57)$$

IRFPA 的多点校正算法的思想就是找到在任意辐射照度 φ 下, 第 j 个探测单元的输出值 $S_j(\varphi)$ 与其校正值 $S'_j(\varphi)$ 之间的函数映射关系为 $S'_j(\varphi) = f[S_j(\varphi_i)]$, 满足:

$$\bar{S}_i = f[S_j(\varphi_i)] \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (5.58)$$

可利用多项式插值法求得该函数映射关系 f , 但是高次插值多项式(如 Lagrange 插值多项式等)并不是随着插值节点的增多而逼近精度越高, 且其计算量相对较大, 不利于工程上实时实现。

2) 分段线性插值算法

所谓分段线性插值就是通过插值节点用折线段连接起来逼近 $f(x)$ 。设已知节点 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ 上的函数值 f_0, f_1, \dots, f_n , 求折线函数 $I_h(x)$ 满足: ① $I_h(x) \in C(a, b)$; ② $I_h(x_k) = f_k, k = 0, 1, \dots, n$; ③ $I_h(x)$ 在每个小区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 上是线性函数, 则称 $I_h(x)$ 为分段线性插值函数。据此原理, 可得到 IRFPA 非均匀校正的分段线性插值算法为

$$S'_j(\varphi) = \frac{S_j(\varphi) - S_j(\varphi_{i+1})}{S_j(\varphi_i) - S_j(\varphi_{i+1})} \bar{S}_i + \frac{S_j(\varphi) - S_j(\varphi_i)}{S_j(\varphi_{i+1}) - S_j(\varphi_i)} \bar{S}_{i+1} \quad (5.59)$$

式中, $S_j(\varphi) \in [S_j(\varphi_i), S_j(\varphi_{i+1})] (j=1, 2, \dots, N)$ 。

3) 三次样条插值算法

根据三次样条插值算法原理可构造如下的 IRFPA 非均匀性多点校正算法:

$$S'_j(\varphi) = \bar{S}_i(1-t) + \bar{S}_{i+1}t - 6^{-1}h_i^2t(1-t)[(2-t)m_i + (1+t)m_{i+1}] \quad (5.60)$$

式中, $t = (S_j(\varphi) - S_j(\varphi_i))/h_i$; $h_i = S_j(\varphi_{i+1}) - S_j(\varphi_i)$; $S_j(\varphi) \in [S_j(\varphi_i), S_j(\varphi_{i+1})] (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$ 。

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \mu_M & 2 & \lambda_M \\ & & & & \mu_{M+1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_M \\ m_{M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_M \\ d_{M+1} \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

式中, $\mu_i = h_{i-1}/(h_{i-1} + h_i)$; $\lambda_i = 1 - \mu_i$; $d_i = (6/h_{i-1} + h_i)(\bar{S}_{i+1} - \bar{S}_i)/h_i - (\bar{S}_i - \bar{S}_{i-1})/h_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, M$); $\lambda = \mu_{M+1} = 1, d_0 = d_{M+1} = 0$ 。

式(5.61)中, $\{m_i, i = 0, 1, \dots, M+1\}$ 可事先用追赶法快速求解、存储以备实时校正时使用。

基于分段线性插值和三次样条插值的 IRFPA 非均匀性多点校正算法,能显著地提高 IRFPA 器件的均匀性,具有校正精度高、动态范围大的特点,并且对 IRFPA 各探测单元的非线性影响不敏感。这两种方法均具有较好的收敛性,即随着均匀参考辐射源的增强,其校正精度越来越高。算法简单,在线计算量小,易于工程上实时实现。

红外成像技术正在突飞猛进地发展,红外探测器是其中的核心部件,但它的非均匀性问题严重影响性能的发挥。因此解决非均匀性问题是红外探测器发展的一个关键问题,虽然方法很多,但是一般难以令人十分满意。无论在军事上还是在商业领域,应用最广泛的仍是两点温度校正法。国内外许多研究机构都正在进行这项研究工作,希望找到更加高效、高速、高精度的软硬件校正方法。

5.4.5 非均匀性表示方法

焦平面阵列非均匀性的表示方法主要有以下 4 种:

(1) 响应率的标准偏差和相对标准偏差。焦平面阵列的非均匀性是该阵列像元响应率的标准偏差与平均响应率之比,是一个百分比。在实际工作中,用一个指定温度的面源黑体为辐射源,测得像元响应电压的标准偏差及其平均值,其比值就是该阵列响应非均匀性的度量。以标准偏差和平均值来表示非均匀性是最经典的做法。

(2) 空间噪声(Spatial Noise)。凝视阵列的探测器响应非均匀性可作为一个重要的噪声源来对待。它同探测器其他噪声源具有不同的性质。非均匀性貌似一种固定图案的噪声,也称为空间噪声。焦平面的总噪声是瞬时噪声和空间噪声的总和。空间噪声的大小等于焦平面的残存非均匀性乘上信号电子数,它是对整个阵列而言的。

(3) 残余固定图形噪声(Residual Fixed Pattern Noise, RFPN)。表示经过一次或多次非均匀性校正后还残余的非均匀性,并且赋予这一概念温度量纲。也可以说是非均匀性所对应的噪声等效温差。

(4) 可校正系数(Correctability)。可校正系数 $c = \sqrt{\frac{\sigma_i^2}{\sigma_n^2} - 1}$, 其中, σ_i^2 是经过非均匀性校正后的残余噪声, σ_n^2 是瞬时噪声。非均匀性校正的目的是使 $c < 1$, 即空间噪声小于时间噪声。在一次校正后,随着长时间的使用, c 逐渐上升,达到或超过 1 时,又要进行新一轮的校正。长期稳定性时间常数就是表征两次校正之间的有效工作时间。

以上四种表示方法,区别仅在于考察的角度不同,其实质是一样的。

5.5 红外凝视系统中的微扫描技术

红外探测器阵列由于受到工艺水平的限制,不能制成用于产生高分辨率红外图像所要求的密度,一般会产生空间欠采样图像,图像中有严重的混淆现象,为了减小这种混淆、提高分辨率,引入了微扫描技术。

通过理论和计算机仿真分析可知,微扫描能有效地减小频谱混淆,提高图像分辨率。由于微扫描利用了同一景像的序列图像之间不同却相互补充的信息,可以更好地重建原始图像。

5.5.1 红外成像过程

凝视成像技术的运用,使探测器所探测到的目标是一个图像而不是一个点,在很大程度上提高了识别真假目标的能力,FPA可以有效提高探测的灵敏度和探测距离。随着IRFPA、二元光学和计算机的发展,新一代的大视场、轻结构的红外凝视成像系统已经形成。现在正在研制和开发“灵巧型”IRFPA,它是一种将IRFPA读出电路和信号处理结合在一起的智能化系统。要求帧成像积分时间、帧图像传输时间和帧图像处理时间在帧周期之内完成。红外热像仪中的焦平面探测器阵列靠探测目标和背景间的微小温差而形成热分布图来识别目标,即使在漆黑的夜晚也能准确地辨别目标。红外焦平面探测器阵列接收到目标物体的红外辐射后,通过光电转换和电信号处理等方式,将目标物体的温度分布图像转换成视频图像。由于红外成像系统在军事、医疗、航天、工业和消防等领域的广泛应用价值,而成为国际上竞相发展的重点。

在凝视成像的过程中,景像首先被光学系统所模糊,经过光学系统模糊的图像再被探测器阵列模糊和采样,最后,利用探测器的采样数据重建并显示图像。众所周知,如果一个系统是线性的和空间不变的,常用MTF来对系统的性能进行评价。然而,采样系统并不满足空间不变的条件,即不满足MTF的假设条件,因此不能用传统的MTF进行分析。

焦平面探测器阵列对模糊图像进行离散采样,在这个过程中,由于探测器单元的尺寸有限会引起模糊,以及由于采样会引入频谱混叠。探测器将采集到的数据输入存储器,然后传输到显示器上进行显示,这时所显示的图像的效果是限定的。

随着探测器阵列在光电系统中的广泛应用,且红外探测器阵列的单元尺寸比较大,那么如何提高红外凝视成像系统的分辨率就成为首要的任务。目前,提高红外凝视成像系统分辨率的方法主要有四类:第一类为纯硬件方法,就是直接改进探测单元的制作工艺,减小探测单元感光单元尺寸,增加探测单元像素数,提高光敏面的使用率。但是减小感光单元的尺寸,增加像素数,受到工艺水平的限制,而且像元减小会带来灵敏度的降低和信噪比的减小。第二类方法采用多块探测器进行几何拼接,以提高探测单元的总像素数。第三类为纯软件方法,即在图像原始信息有限的前提下,用软件插值算法,增加输出图像的像素数,但是,因其原始信息量没有增加,严格意义上来讲难以提高分辨率。第四类即是微扫描方法,它是在不增加探测单元像素数的情况下有效提高分辨率的常用方法。

现在,在可见光领域的探测器的填充因子可达100%,而红外探测器由于制造工艺等问题还不能做到很高的填充因子,由于探测单元之间有间隔,探测单元的实际填充因子只有30%~90%。提高填充因子对于制作工艺的要求是很高的,成本也很昂贵。具有高分辨率的红外探测器阵列不容易获得。因此,讨论在红外凝视系统中引入微扫描的方法,在不对探测器阵列提出过高要求的前提下,有效地提高含有探测器阵列的成像系统的分辨率。因此,微扫描技术的研究对于红外成像系统的发展具有现实意义。

5.5.2 微扫描

CCD图像传感器在对空间频率较丰富的景物进行成像时,由于有限的CCD像元尺寸的限制,图像分辨率低,混频现象有时很严重,红外成像系统尤其如此。目前我国高密度的IRFPA的制备技术还不完善,而且制作成本昂贵。CCD对图像的接收和记录过程直接影响到最终的成像质量,尤其在航天、遥感和目标识别等领域,要求系统有较高的分辨率。微扫描技术的引进可以在不对CCD探测器阵列提出过高要求的前提下,有效地改善系统的成像质量。因此,微扫描是一种在不增加探测器数目的情况下,提高成像系统分辨率、改善成像质量的重要方法。微扫描技术常用在凝视成像系统中,它在红外凝视成

像系统中的应用尤为普遍。随着 FPA 和计算机技术的快速发展,微扫描技术获得了更大的发展空间。

微扫描技术是以采样定理为理论基础的,采样定理给出了一个重要的结论:一个连续的带限函数可以由它的离散的采样序列代替,而且并不丢失信息。实际情况下,图像的带宽并不满足带限及系统的 Nyquist 条件,采样过程会引起频谱混叠。为了减少频谱混叠对图像造成的模糊效应,最直接的办法就是减小探测器单元之间的间距。但是高度密集的探测器受到工艺水平的限制,而且成本较高,因此发展了微扫描技术,它能够在不增加探测器单元数的前提下有效地提高系统分辨率,减小频谱混叠的影响,下面就来详细的阐述微扫描的工作原理。

1. 微扫描的工作原理

微扫描是一种减少频谱混叠的常用方法,它利用微扫描装置将光学系统所成的图像在 x, y 方向进行 $1/N$ (N 为整数) 像素距的位移,得到 $N \times N$ 帧欠采样图像,并运用数字图像处理器将多帧经过亚像素位移的图像重建成一帧图像,从而最终实现提高分辨率的目的。

在光电成像过程中包含探测器阵列对图像的采样过程,根据采样定理可以知道,对于带限的图像,只要采样频率高于图像的 Nyquist 频率的两倍,利用重建系统进行滤波处理,就可以完全恢复图像。但是,通常情况下采样频率都低于图像的两倍 Nyquist 频率,这种情况称为欠采样,这会引起图像信号的频谱混叠,从而使成像质量下降。为了减小采样的影响,而不提高对探测器的要求,引入了微扫描方法。

通常微扫描有两种模式:一种是在垂直和水平方向进行的双向扫描,也称矩形双向扫描模式,以 2×2 微扫描为例,它是将图像沿水平和垂直方向分别移动像素间距的一半,得到四帧低分辨率图像, 3×3 微扫描是将图像沿水平和垂直方向分别移动像素间距的三分之一,得到九帧低分辨率图像;另一种是对角线扫描模式,它是将图像沿着由相邻四个有效像元之间的间距对角线移动对角线长度的一半,得到两帧低分辨率图像。其中最常用的是矩形双向微扫描模式。考虑下面的 2×2 微扫描的情况,假设 FPA 的采样栅格如图 5.23 所示,该采样栅格用一个矩形点阵来表示。采样间距取作 1 毫弧度 (mrad),黑点表示单个探测器单元,空间的空白部分表示非敏感区。

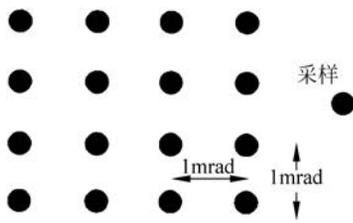


图 5.23 每帧场像的采样栅格

图 5.24 显示了矩形双向微扫描模式。第一帧场像是在位置 1 处,当微扫描装置固定时由 FPA 所采集的图像经过时间 τ ,微扫描装置将采样位置向右移动阵列间距的一半到达位置 2,在微扫描装置移动时,经由 FPA 采样的第一帧场像被输出到数字存储器中。微扫描装置稳定在位置 2,采集第二帧场像,这帧场像里包含了一些在第一帧场像里没有采集到的探测器单元之间的非敏感区的信息。图像被移动到采样位置 3 时,进行第三帧场像的采集。这个过程重复到第四帧场像,并返回 1 位置,开始下一帧图像的采集。如果景像是静态的,当所有的场像组合时,水平和垂直方向的有效采样间距为 0.5 mrad 。这说明,使用微扫描方法可使采样间距减小 $1/2$,则水平和垂直方向的采样频率增大为原来的 2 倍,最高可探测频率也增大为原来的 2 倍。

与矩形双向微扫描模式类似,对角线微扫描模式是将图像在 FPA 上移动了由四个相邻探测器单元所确定的矩形对角线间距的一半,如图 5.25 所示。

由微扫描产生的序列图像必须在显示前进行处理,依照所选择的微扫描模式,利用所有的序列图像的交错像素形成微扫描图像。在成像系统中包含一个实时图像处理器,这个处理器是一个双重帧缓存器结构。这个缓存器有不同的读写次序。实时微扫描处理器直接由序列图像建立微扫描图像,并把它发送到高速视频总线进行显示。图像的重建就是利用同一物体的多帧场像之间不同但相互补充的信息进行超分辨率复原,从一系列低分辨率的图像恢复出高分辨率的单帧图像,从而改善成像系统的成像质量。

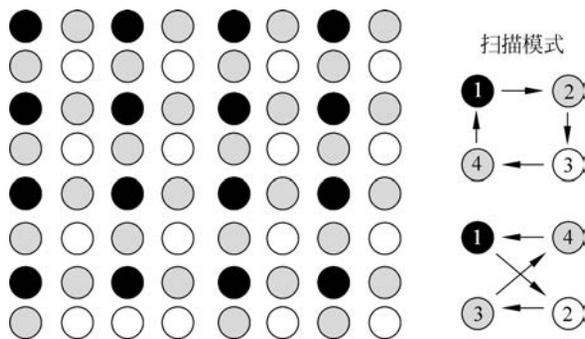


图 5.24 矩形双向微扫描模式

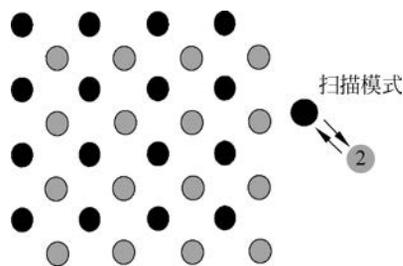


图 5.25 对角线微扫描模式

由于人眼的视觉残留特性,当帧频足够高,如每秒 24 帧时,人眼就感觉不到一帧图像是不连续的,因此,为不使人眼对图像有闪烁的感觉,在微扫描中帧频应高于每秒 24 帧,假设采用的帧频为 30Hz,则在 2×2 微扫描模式时,场频为 120Hz,也就是说,在 $(1/120)\text{s}$ 的时间内,一帧场像已经完成了移动和采集图像的过程。现有的红外探测器的积分时间能满足执行微扫描所需的条件。

2. 微扫描的工作模式

微扫描的工作模式决定了在探测器平面上图像的移动的周期和路线。图 5.26 所示是一些常用的微扫描模式,它们的实质是相同的,只是路线、帧频和周期略有不同。微扫描的步数越多,说明探测器的采样间距越小,空间采样率越高,对图像分辨率的提高越好。

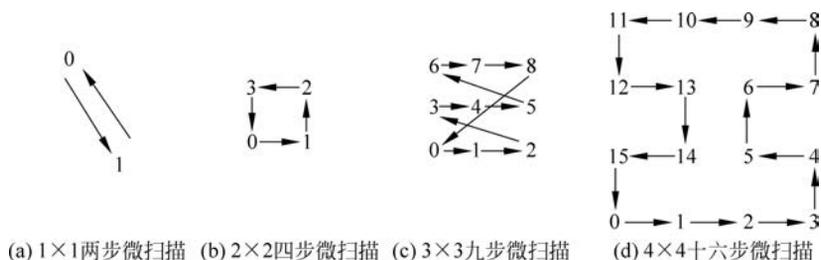


图 5.26 微扫描工作模式

3. 微扫描装置

为了实现图像在阵列上的移动,要求系统内有一些移动机械装置,即微扫描装置。常用的微扫描机械装置是将扫描反射镜、扫描透镜、扫描探测器和扫描棱镜与压电陶瓷驱动器进行组合构成的,它们都有各自的优缺点。移动焦平面自身当然是最直接的方法,但这并不是一个好的选择,FPA 常安装在沉重的模块上,由于压电陶瓷驱动器上的重量过载,精确和快速地移动很难实现。采用扫描棱镜的方法可以实现快速移动,且重量较轻,但是会引入一些色差,对于宽波带的系统是不适用的。扫描反射镜有消除像差的优势,然而它要求光路的折转,在有些系统中可能很麻烦,而且它可能引起图像在探测器上不可忽略的旋转,这也是很难补偿的。两个摆动平面镜可以使图像在阵列上产生二维的移动,摆动平面镜做快速移动,因为机构本身有一定的惯性,所以摆动平面镜稳定性很差,不适合高速扫描。而且在高速摆动的情况下,视场边缘变得不稳定,并且要求较高的电机传动功率,总体来说不适合高速扫描。

扫描透镜是指移动探测器阵列前的聚焦透镜的方法,这种方法的优势是非常简洁,通常只需要驱动一块扫描透镜,扫描透镜产生低的色差可以通过前面的固定的透镜组来实现校正。而且透镜的移动量正好是所要求的图像在像面上的移动量,如图 5.27 所示。

微扫描装置的作用是使图像的位移频率与 FPA 的帧频同步,并将微扫描的步长设置成所选的工作

模式,确定扫描路线。微扫描装置的转动是很小的,图像在 FPA 上进行亚像素(小于采样间距)的平移,而且微扫描装置可以制成对几个轴进行扫描。例如,图 5.28 给出的是微扫描透镜与压电陶瓷驱动器相结合的微扫描装置。微扫描透镜前是一个望远系统,利用微扫描透镜将景像成像在 FPA 上,微扫描透镜被固定在一个双轴移动平台上,这个移动平台受到压电陶瓷驱动器的驱动产生亚像素的位移,从而使图像在 FPA 上产生移动。

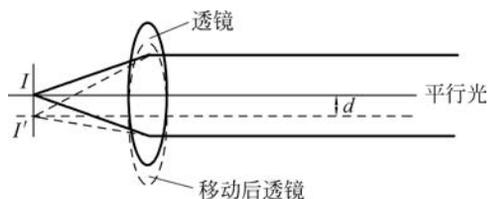


图 5.27 微扫描透镜移动示意图

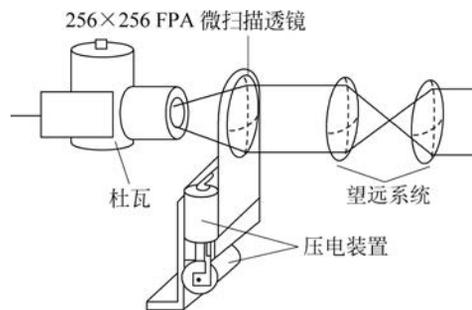


图 5.28 微扫描装置

4. 微扫描的过程模型

光电成像系统一般包括光学成像子系统、采样子系统和重建子系统。光学成像子系统对目标成像,这个像是模糊像,它是由于光学系统的衍射和像差等多种因素所造成的;采样子系统利用探测器阵列对光学系统产生的模糊图像进行离散采样,产生场像;重建子系统是将经过探测器阵列离散采样的图像数据进行重建并显示的过程。这里重点考虑采样子系统。

物 $o(x, y)$ 经光学成像子系统成像,产生模糊像 $i(x, y)$, 假设光学成像子系统是线性系统, $i(x, y) = o(x, y) * h(x, y)$, 在这里 $h(x, y)$ 是系统的点扩散函数, 符号 $*$ 表示卷积运算, 由探测器阵列对连续图像 $i(x, y)$ 采样产生采样图像为 $i_s(x, y)$, 则有

$$i_s(x, y) = \left[\frac{1}{w_x w_y} a\left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y}\right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) \quad (5.62)$$

式中, $a(x, y)$ 是描述每个探测器单元(像素)形状的函数; w_x 和 w_y 分别代表在 x 和 y 方向的像素宽度; d_x 和 d_y 表示在 x 和 y 方向的像素之间的间距。在式(5.62)中忽略了探测器阵列的有限尺寸的影响。其中梳状函数的定义为

$$\text{comb}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - n, y - m) \quad (5.63)$$

对式(5.62)进行傅里叶变换, 获得图像的空间频率谱 $I_s(\xi, \eta)$ 如下:

$$I_s(\xi, \eta) = [A(w_x \xi, w_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta) \quad (5.64)$$

大写字母表示相应小写字母的傅里叶变换。从式(5.64)可以看出, 像素孔径和光学系统会对物的空间频率内容进行滤波(或模糊), 并且由于梳状函数卷积的原因, 模糊的物光谱在采样点处被复制, 产生频谱混叠。

现在考虑 2×2 微扫描的情况, 即连续图像被微扫描装置在 x 和 y 方向分别移动了像素间距的一半, 微扫描过程产生的采样图像为

$$i_{ms}(x, y) = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{w_x w_y} a\left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y}\right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \frac{1}{d_x d_y} \left\{ \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) \right\} \quad (5.65)$$

式(5.65)中的系数 1/4 表示每帧场像积分时间相对于非微扫描时间的减少,四帧微扫描图像上收集的总能量与单个的、非微扫描图像的总能量相同。

对式(5.65)进行傅里叶变换,得到微扫描图像的空间频率光谱为

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(\omega_x \xi, \omega_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \{ \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta) \times [1 + e^{-i\pi d_x \xi} + e^{-i\pi d_y \eta} + e^{-i\pi(d_x \xi + d_y \eta)}] \} \quad (5.66)$$

运用式(5.63)可将式(5.66)写为:

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(\omega_x \xi, \omega_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \xi - n, d_y \eta - m) [1 + e^{-i\pi n} + e^{-i\pi m} + e^{-i\pi(m+n)}] \right\} \quad (5.67)$$

注意式(5.67)中的大括号内,当 n, m 为偶数时,值为 4,对于 n 和 m 的其他组合则值为 0,也就是说只有偶级谱引入混叠,由此可知 2×2 微扫描可以减小基带内的频谱混叠,非零级谐波与基带图像频谱有了较大的分离,等效于 Nyquist 频率提高了一倍。这种影响如图 5.29 所示,为了简使用一维表示,图中带有竖线的部分表示基带, ξ_0 表示不采用微扫描时的频域的采样间距。由前述的采样定理可知,在图像重建的过程中只取基带部分,从图 5.29 可以看出基带内含有其他谐波的成分,也就是说在重建图像中会有混叠。采取 2×2 微扫描后采样间距减小到原来的一半,则频域的采样频谱间距增大到原来的两倍,即 $2\xi_0$ 。比较图 5.29 和图 5.30,可以看到基带和谐波的交叠减少了,这个减少量也取决于频谱的形状。如果要减小高级频谱的影响,则只能增加微扫描步数。

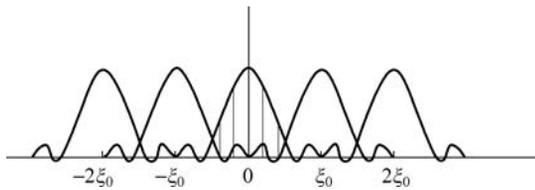


图 5.29 采样图像的频谱

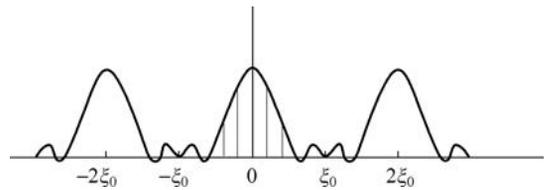


图 5.30 微扫描图像的频谱

由 2×2 四步微扫描产生的图像结果,给出 3×3 九步微扫描空间频率光谱的结果:

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{9} [A(\omega_x \xi, \omega_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \xi - n, d_y \eta - m) \times \left[1 + e^{\frac{-i2\pi n}{3}} + e^{\frac{-i4\pi n}{3}} + e^{\frac{-i2\pi m}{3}} + e^{\frac{-i4\pi m}{3}} + e^{\frac{-i2\pi(n+m)}{3}} + e^{\frac{-i4\pi(n+m)}{3}} + e^{\frac{-i2\pi(2n+m)}{3}} + e^{\frac{-i4\pi(2n+m)}{3}} + e^{\frac{-i2\pi(n+2m)}{3}} + e^{\frac{-i4\pi(n+2m)}{3}} \right] \right\} \quad (5.68)$$

只使用 1×1 两步微扫描就可以实现频谱混淆的减少,对于两步微扫描采样图像为

$$i_{ms}(x, y) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\omega_x \omega_y} a \left(\frac{x}{\omega_x}, \frac{y}{\omega_y} \right) * o(x, y) * h(x, y) \right) \frac{1}{d_x d_y} \left\{ \text{comb} \left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y} \right) + \text{comb} \left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2} \right) \right\} \quad (5.69)$$

相应的空间频率光谱为

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{2} (A(\omega_x \xi, \omega_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \xi - n, d_y \eta - m) \{ 1 + e^{-i\pi(m+n)} \} \quad (5.70)$$

从式(5.70)可以看出,当 n, m 相等或均为奇数和偶数时,大括号内的项的值为 2,其他情况均为 0。

与式(5.67)比较可知两步微扫描的非零项多于四步微扫描的情况,因此两步微扫描的频谱混叠大于四步微扫描的频谱混叠。

微扫描技术引入红外凝视成像系统中,等效于减小了采样间距,增加了空间采样率,从前面的叙述可知,微扫描能够减小图像中的频谱混叠,提高分辨率。

5.5.3 非均匀微扫描

前面所描述的微扫描技术,能有效地减小红外图像的频谱混叠,提高成像系统分辨率。通常说的 N 级微扫描是一种均匀微扫描:将目标图像分别在 x, y 方向上进行 $1/N$ (N 为整数)像素距的亚像素位移,得到 $N \times N$ 幅欠采样图像置在更精细的网格上,合成一幅Nyquist频率提高到 N 倍的微扫描图像。在微扫描技术中包括了多幅图像的插值,这些图像包含了同一场景的近似但又不完全相同的信息,利用了这些相互补充的信息,就可以更好地还原原始图像。利用压电陶瓷驱动器和光学元件相结合的微扫描装置来产生微位移,从而得到了多幅低分辨率的图像。这种微扫描的方式被称为受控微扫描,简称微扫描,是一种均匀微扫描。

但在一些实际应用中,并不能保证得到的多帧图像的相对位移在像素网格上是均匀分布的。但是只要图像之间有非整数倍的位移,就可以获得更多的信息,直观上讲,就该有机会合成一幅质量更好、混叠减少的图像,所以有必要注意非均匀微扫描的情况。

前视红外探测器阵列系统经常被安装在无人机、小型直升机、车辆和坦克上,安装平台会由于运动而产生正常的抖动,利用这种抖动也可以获得图像的移动,只要这种移动是亚像素的,图像之间就会包含有互补的信息,同样也可以利用这些互相补充的信息来重建高分辨率的图像,这种微扫描的方式被称为抖动微扫描或非受控微扫描,是一种非均匀微扫描。因此这种系统中不再需要微扫描镜和驱动系统。但是由抖动得到的这些图像之间的移动量是随机的,如果能利用某种算法得到图像之间的这种移动量,就可以利用这些多幅图像重建高分辨率图像,下面介绍这种运算法则。

如果红外凝视成像系统被安装在一个抖动的移动平台上,这样就产生了一个非受控的、随机的抖动模式。这里得到的每一幅图像的移动量都是未知的,要利用这些图像重建一幅高分辨率图像,首先必须估计出图像之间的这些移动量,然后根据这些移动量将多幅低分辨率图像插值重建成高分辨率的图像。

第一幅获得的图像用 $o_1(x, y)$ 来表示,并将它定义为参考图像,其余图像的移动量是相对于参考图像得出的。 h_k, v_k 代表第 k 幅图像在水平和垂直方向的移动量, p 表示抖动过程所得到的图像的总数。那么,观察到的第 k 幅图像可以表示为

$$o_k(x, y) = o_1(x + h_k, y + v_k) \quad (k = 2, 3, \dots, p) \quad (5.71)$$

对于参考图像来说, $h_1 = 0, v_1 = 0$ 。对式(5.71)进行泰勒级数展开,前三项可以表示为

$$o_k(x, y) \approx o_1(x, y) + h_k \frac{\partial o_1(x, y)}{\partial x} + v_k \frac{\partial o_1(x, y)}{\partial y} \quad (5.72)$$

式(5.72)本身就是一个近似, x, y 方向的移动估计量是分离的,可利用最小二乘法对 h_k, v_k 求解,最小二乘法误差表示为

$$E_k(h_k, v_k) \approx \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[o_k(m, n) - o_1(m, n) - h_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} - v_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right]^2 \quad (5.73)$$

这个计算的目的是为了使得误差值最小,也就是使 $o_k(x, y)$ 尽量接近 $o_1(x, y)$,这里 m, n 是 x, y 方向的独立变量。 M, N 代表在 x, y 方向的像素的总数。 h_k, v_k 仍然分别表示第 k 幅图像和参考图像之

间在 x 、 y 方向的移动量。为了对误差进行最小化,对式(5.73)求一阶导数,并使一阶导数的值为零。对式(5.73)中的 h_k 、 v_k 进行微分,得到了下面的两个等式:

$$\begin{aligned} \sum_m^M \sum_n^N \left(o_k(m, n) - o_1(m, n) - h_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} - v_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) \left(-\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \right) &= 0 \\ \sum_m^M \sum_n^N \left(o_k(m, n) - o_1(m, n) - h_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} - v_k \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) \left(-\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (5.74)$$

式(5.74)利用矩阵的形式求解更方便,写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \right)^2 & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (o_k(m, n) - o_1(m, n)) \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (o_k(m, n) - o_1(m, n)) \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \end{bmatrix} \quad (5.75)$$

式(5.75)的简化形式为

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{S} = \mathbf{V} \quad (5.76)$$

式中, $\mathbf{S} = [h_k \quad v_k]^T$

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \right)^2 & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right) & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \right)^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{V} &= \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (o_k(m, n) - o_1(m, n)) \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (o_k(m, n) - o_1(m, n)) \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.77)$$

因此用 $\mathbf{S} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{V}$, 可以算出移动估计量。

对于一个离散函数 $f(i, j)$, 利用差分来代替微分, 在 x 和 y 的一阶差分的定义为

$$\begin{aligned} \Delta_x f(i, j) &= f(i, j) - f(i-1, j) \\ \Delta_y f(i, j) &= f(i, j) - f(i, j-1) \end{aligned} \quad (5.78)$$

因此

$$\begin{aligned} \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial m} &= o_1(m, n) - o_1(m-1, n) \\ \frac{\partial o_1(m, n)}{\partial n} &= o_1(m, n) - o_1(m, n-1) \end{aligned} \quad (5.79)$$

利用式(5.77)就可以求出图像之间的移动量。为了验证这种算法的正确性,以四帧低分辨率图像进行计算,以第一帧图像为参考图像,求出其他三帧图像相对于第一帧图像的移动估计量。理论移动量与算法得到的移动估计量之间的比较如图 5.31 所示。

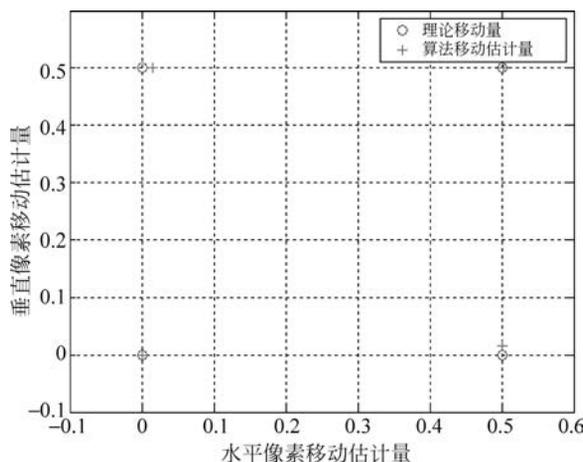


图 5.31 理论的移动量与算法得到的移动估计量之间的比较

图 5.31 中的圆圈表示四帧图像的理论移动量,加号表示由上面的算法得到移动估计量。图 5.31 说明这种移动估计算法能很好地求出图像之间的移动估计量。

得到了图像之间的移动估计量,就可以利用这些图像和它们之间的移动量重建高分辨率图像。取移动估计量的最邻近值,也就是正好使图像之间的这种移动量等于高分辨率图像的单元长度。同样采用在空域错位叠加的方法,可以得到这个高分辨率图像。

传统的图像插值方法是在一帧图像上利用局部信息进行线性插值或样条函数插值,这些方法使图像的高频细节被丢失,且无唯一解。1981年, Tsay 首次提出了从多帧互有位移的图像序列中插值产生一帧高分辨率图像的概念,根本上解决了图像超分辨率无唯一解的问题。后来研究者们又提出了迭代反向投影算法、凸集投影算法、实时串行迭代算法、能量连续降减法 and 贝叶斯方法等多种算法。

采用空域错位叠加的方法,已经很好地证明微扫描在成像过程中的重要作用,如果采用一些更优的重建算法,得到的图像会比直接叠加重建的图像效果要好一些。

微扫描是一种在不增加探测器数目的情况下,提高成像系统分辨率,改善成像质量的有效方法。非均匀微扫描,只要能够求出图像之间的移动量,就可以利用图像之间互补的信息重建高分辨率的图像。

微扫描过程可以有效地改善 FPA 的分辨率,可达到与单个探测器连续扫描几乎接近的性能。然而目前微扫描技术主要受到以下几方面的限制:

(1) 对于给定的帧频,探测器对图像进行采样的积分时间减少了,对探测器的灵敏度和响应时间有较高的要求。需要明确的是,对于每帧图像要求的积分时间乘以微扫描过程的步数的结果不可超过可用的帧周期。为了尽量减小微扫描镜振动的影响,应尽量减小微扫描镜的移动时间,多留时间稳定微扫描镜。

(2) 微扫描过程要进行大量的数据处理,要进一步研究图像的重建算法,尽量减小运算时间,以便进行实时处理。微扫描步数和探测器灵敏度的要求要和实时的数字图像处理达到一个折中。

(3) 微扫描技术还受到压电陶瓷从一点移动图像到另一点的时间和精度限制。

微扫描技术是一种有效的提高成像系统分辨率的技术。因此,研究微扫描的工作原理和工作过程,并对其进行计算机仿真,以此来指导微扫描的开发和研制,具有理论研究价值和应用价值。

5.6 热像仪产品选例

这里对不同公司生产的热像仪产品进行选例介绍,可以看出不同公司的产品,其性能类别和参数是不同的。

1. 某公司 640×480 IRFPA

该产品概况和技术性能具体如下:

1) 产品概况

该公司的这种红外技术可生产多种扫积性 IRFPA 和凝视 IRFPA。典型产品是 640 元×480 元器件,在长波红外和中波红外中都可获得 640 元×480 元器件。这种 FPA 采用碲镉汞敏感材料,调节所需的截止波长。

2) 技术性能

光谱频带	长波红外 10~10.5 μm 中波红外 5~5.5 μm
像元间距	25 μm
信号输出数	4
额定探测率	
长波红外 D^*	$>5 \times 10^9 \text{ Jones}$ (1Jones = $1\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)
中波红外 D^*	$>5 \times 10^{10} \text{ Jones}$

2. 某公司的红外探测器

该产品概况和技术性能具体如下:

1) 产品概况

该公司生产多种第 2 代和第 3 代 MCT 红外探测器。这些探测器可作为探测杜瓦装置(DDA)或整体探测杜瓦致冷器装置(IDDCA)提供。这些探测器适用于热像仪、寻的器、红外搜索与跟踪系统和其他应用。

可提供工作在 1~3 μm 、3~5 μm 或 8~12 μm 波段的光伏探测器。碲镉汞线性 CCD 阵列已生产有 32~1500 元,甚至更大规模。所有这些阵列都采用 CMOS 读出技术。线性阵列采用机内时间延迟积分,可获得 4 元×48 元~6 元×480 元,甚至更大规模阵列。在绝大多数种类中均可获得 3.5 μm 、5 μm 和 10.5 μm 截止波长。

面阵可获得 128 元×128 元、256 元×256 元、320 元×256 元,甚至更大规模,也可获得 3.5 μm 、5 μm 和 10.5 μm 截止波长。所有都采用互补性金属氧化物半导体读出。640 元×480 元较大阵列已商品化。

该公司研制的 288 元×4 元探测器阵列用于许多红外系统,多作为特定用途,如导弹、瞄具,用于飞机、舰船的红外搜索与跟踪系统等。

2) 技术性能

288 元×4 元长波 IRFPA/IDCA(红外焦平面阵列/集成探测器/致冷器装置)

阵列类型 碲镉汞 8~12 μm TDI(Time Delay and Integration,时间延时积分)/多路调制 FPA

探测器 288 元×4 元碲镉汞 PV 二极管

TDI 4 元时可获得

信号输出数 16

输出动态范围	2.5V(>80dB)
元件灵敏尺寸	25 μm ×28 μm
NETD(平均)	20mK
像元速率	2MHz 最大(每次输出)

128 元×128 元长波 IRFPA/IDCA

阵列类型	8~12 μm 凝视/快摄 FPA
元数	16384 碲镉汞 PV 二极管
阵列格式	128 元×128 元
动态范围	2.8V(81 dB)
NETD(平均)	10mK
帧频	直到 300Hz

480 元×6 元长波 IRFPA/IDCA

阵列类型	碲镉汞 8~12 μm TDI/多路调制 FPA
探测器	480 元×6 元碲镉汞 PV 二极管
TDI	6 元时可获得
信号输出数	16
输出动态范围	3V(74dB)
NETD(平均)	20mK
像元速率	5MHz 最大(每次输出)

320 元×256 元中波 IRFPA/IDCA

探测器类型	碲镉汞 3~5 μm 凝视/快摄 FPA
元数	81920 碲镉汞 PV 二极管
阵列格式	320 元×256 元
NETD(平均)	88mK
帧频	可变至 400Hz
信号输出数	1~4(可选择)

3. 某通用非致冷红外热像机芯

技术性能如下：

器件类型：320 元×240 元非致冷非晶硅 FPA；

响应波段：8~14 μm ；

NETD：0.12 $^{\circ}\text{C}$ (@25 $^{\circ}\text{C}$)；

启动时间：25s(@25 $^{\circ}\text{C}$)；

稳定时间： $\leq 3\text{min}$ (@25 $^{\circ}\text{C}$)；

工作时间限制： $> 2\text{h}$ ；

视频输出：BNC 插座，模拟视频 CCIR 制；

数字视频(选配)：DB15 插座 10bit 输出；

功耗: $\leq 5\text{W}(@25^\circ\text{C})$;

外形尺寸: $108\text{mm} \times 108\text{mm} \times 100\text{mm}$;

重量: $\leq 750\text{g}$;

供电要求: DC7.2V;

外接操作控制(断接): NUC 1D(单点校正), AUTO(对比度调节);

一次单点校正所需时间: 约 10s;

工作温度: $0 \sim +45^\circ\text{C}$;

防护: IP55;

电源控制盒(选配): 220V、50Hz; 提供热像仪电源, 提供单点校正与对比度调节按键。

4. 某型通用非致冷热像仪机芯

技术性能如下:

器件类型: $320 \text{元} \times 240 \text{元}$ 非致冷非晶硅 FPA;

响应波段: $8 \sim 14\mu\text{m}$;

NETD: $0.1^\circ\text{C}(@25^\circ\text{C})$;

启动时间: $30\text{s}(@25^\circ\text{C})$;

稳定时间: $1\text{min}(@25^\circ\text{C})$;

增益: 自动增益;

单点校正: 每隔 5min 自动校正;

校正时间: 3s;

视频输出: BNC 插座, 模拟视频 CCIR 制;

数字视频(选配): LEMO EGG4B(50 芯) LVDS 14bit 输出;

功耗: $\leq 6\text{W}(@25^\circ\text{C})$;

供电: DC7~14V;

外形尺寸: $110\text{mm} \times 80\text{mm} \times 80\text{mm}$;

重量: $\leq 900\text{g}$, 带数字口输出重量为 1050g;

工作温度: $-20 \sim +45^\circ\text{C}$;

防护: IP67。

该通用热像仪允许在露天和供用户做二次开发使用, 其整机设计能够抵御风沙、潮湿和雨雪。并且热像仪设备本身在冲击、振动和高热低温环境下均能正常工作。

作为一种通用光电装备, 可主要用于武器瞄准器、目标侦察、光电火控、警戒探测、空降导航和杀伤力评估等军事领域, 适合于多军兵种通用设备的使用和进一步开发增强功能的基本设备。

5. 某型红外瞄准镜

某型红外瞄准镜配合肩扛式导弹使用, 用于射手准确捕捉、瞄准目标。红外瞄准镜与装筒导弹、发射机构组成完整的武器系统, 也可配置成用于手持式设备。

红外探测器: $320 \text{元} \times 240 \text{元}$ 非致冷焦平面列阵;

响应波段: $8 \sim 12\mu\text{m}$;

红外镜头: 焦距 75mm/F0.8;

视场角: $12^\circ \times 9^\circ$;

重量: 2.2kg;

供电方式：锂电池、7.2V、2A·h；
 工作时间：一次充电设备可连续工作 1h；
 显示器件：2.5in 液晶显示屏，目镜观察；
 产品优点：集成红外线机芯、锂电池、液晶显示器一体化，适合便携。

6. 某型红外镜头

某型红外镜头如图 5.32 所示。

技术性能如下：

焦距：75mm；
 相对孔径：0.8；
 调焦方式：手动调焦；
 像面尺寸：18mm。



图 5.32 某型红外镜头

7. 某型监控热像仪机芯

某型监控热像仪机芯技术性能如下：

器件类型：320 元×240 元非晶硅 FPA；
 响应波段：8~14 μ m；
 NETD：0.1 $^{\circ}$ C(@25 $^{\circ}$ C)；
 启动时间： \leq 5s(@25 $^{\circ}$ C)；
 稳定时间： \leq 15s；
 自动单点校正间隔：5min；
 单点校正时间： \leq 1s；
 增益：固定增益；
 视频输出：BNC 插座，模拟视频 CCIR 制；
 数字视频(选配)：Thomas & Betts SCSI IDC (26 芯)；
 功耗： \leq 2.5W(@25 $^{\circ}$ C)；
 供电：DC6~15V；
 外形尺寸：94mm(W)×64mm(H)×64mm(L)；
 重量： \leq 320g；
 工作温度： $-20\sim+50^{\circ}$ C；
 防护：IP55；

产品优点：启动迅速，整机性能稳定，图像均匀性很好，像质优等。



图 5.33 某型热像摄像机

8. 某型热像摄像机

某型热像摄像机如图 5.33 所示。

技术性能如下：

适用极限夜视环境：0lx；
 识别人体距离：350m(使用电子放大功能距离可以增加 1.3~1.9 倍)；
 外形尺寸：110mm×180mm×360mm，不计把手高 130mm；
 整机重量：2.2kg(不包括锂电池)；
 工作温度： $-20\sim50^{\circ}$ C；
 工作湿度：在 85% 以内。

热像摄像机可昼夜两用,还可用于对抗烟幕迷茫,揭示、识别敌方伪装和微波隐身目标。是全天候、24h 作战的一种重要工具。热像仪不需要人工辅助照明,热像仪在某种程度上可以穿透烟、雾进行观察,并且作用距离远。在观察大于 1km 的远距离目标时,使用效果优于微光夜视仪。热像仪的优点还在于它可以探测到用其他手段难以发现(或无法区别)的目标。例如,它可以发现军事人员与车辆活动过后来又撤离的场所,还可以揭露各种军事伪装,“透过”丛林及伪装网看清目标。但有的热成像系统分辨本领赶不上近红外和可见光成像系统。夜光下(和昼间阳光下)物体的阴影有助于形成立体形象,但热图中物像几乎没有阴影,因而缺乏立体感。

5.7 红外传感器工程设计出发点及分析

红外传感器是红外系统的主要功能单元之一,主要任务是对各种动静态目标进行探测,并将探测到的目标信号送给红外信息与图像处理单元进行处理。红外传感器工程设计的优劣对整个系统的性能实现具有至关重要的作用。因此,针对具体的应用对象和场合,对红外传感器的工作波段、组成、探测器选型、红外光学系统和红外信号预处理等工程设计内容进行研究是不可或缺的。

从红外物理学的基本概念和普朗克定律出发,可以通过对目标背景光谱辐射对比度的分析和两个波段的工作环境、实际应用情况等因素的比较,给出红外成像系统工作波段的选择方法,所给出的选择因素是红外系统设计的基本出发点。根据某型红外系统的功能性能要求,提出相应红外传感器的主要功能和具体性能指标。在分析红外传感器工作原理的基础上,进行红外传感器的组成方案设计,包括物镜、红外探测器的组成、红外信号预处理电路、控制与通信电路等方面的内容,尤其是分析确定 NUC 的工程方法。对红外探测器组件的选型进行分析,对物镜光学系统进行工程方案设计,确定其具体参数。针对物镜的温度补偿问题,确定选用具体有效的温度补偿方法。

5.8 红外工作波段的选取分析

3~5 μm 和 8~12 μm 波段的红外成像技术,一直是红外成像技术发展的重点。两个波段哪个波段在远距离探测方面性能优越,因假定的条件、应用的场合和选用的数据不同,结论有所差别。从 20 世纪 70 年代开始,该问题一直在讨论中,可见该问题的重要性。由于红外成像系统的敏感器件探测器响应的是目标、背景的辐射功率,因此确切地讲,红外成像是利用目标与背景的辐出度(Radiant Exitance)差实现的。这个辐出度差称为辐射对比度(Radiant Contrast),它不等同于辐射温差,对于相同的温差,辐射对比度会随着波段的的不同有所变化。因此,可以通过选择合适的光谱通带,获得最大的目标背景辐射对比度。下面将探讨不同的目标温度应用场合,如何选择红外系统的工作波段,以获得最大的辐射对比度。

5.8.1 光谱辐出度

由普朗克辐射公式:

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (5.80)$$

可知黑体的光谱辐出度 $M(\lambda, T)$ 有一个极大值,对应极大值的波长 λ_m 称为峰值波长。假定背景辐射温度为 $T_1 = T$, 目标辐射温度为 $T_2 = T + \Delta T$, 可以得到如图 5.34 所示的两条光谱曲线。不难看出,

尽管目标背景的辐射温差 ΔT 相同,但辐出度 ΔM 却不相同,而且 ΔM 的极大值也不在峰值波长 λ_m 处。后面将详细说明辐出度 ΔM 与 λ 的关系。

5.8.2 光谱辐射对比度

在目标背景温差相对较小的情况下,以微分近似有限差分,可以得到由温差变化引起的黑体辐射功率的变化:

$$\frac{\Delta M(\lambda, T)}{\Delta T} = \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)^2} \quad (5.81)$$

也即

$$\Delta M(\lambda, T) = \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)^2} \Delta T \quad (5.82)$$

它表明辐出度的增量随温差的变化幅度与温度、波长有关,对某一特定的温度,可以得到光谱辐射对比度曲线如图 5.35 所示,从中可以直观地发现光谱辐射对比度存在一个极大值。但它是否存在且只存在一个极大值,这个极大值存在于何处呢?下面将进行详细说明。

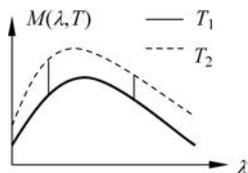


图 5.34 两条光谱曲线

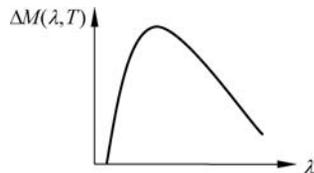


图 5.35 光谱辐射对比度曲线

5.8.3 光谱辐射对比度极值波长

为求得光谱辐射对比度的极大值,对式(5.82)进行微分,并令其结果等于零。由于只考察在某一特定温度下, ΔM 与 λ 的变化关系,故可在推导中将 T 、 ΔT 看成常量,即

$$\frac{d}{d\lambda}(\Delta M) = 0 \quad (5.83)$$

得到

$$\frac{c_1 c_2 \Delta T}{\lambda^7 T^2} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)^2} \left(\frac{2c_2}{\lambda T} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} - \frac{c_2}{\lambda T} - 6 \right) = 0 \quad (5.84)$$

式(5.84)中前两项均不可能等于零,只有

$$\frac{2c_2}{\lambda T} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} - \frac{c_2}{\lambda T} - 6 = 0 \quad (5.85)$$

就目前红外成像所采用的工作波段和温度范围,取极端情况也能满足 $c_2 > 3\lambda T$,则 $e^{c_2/\lambda T} / (e^{c_2/\lambda T} - 1) \approx 1$,故式(5.85)可简化为

$$\frac{2c_2}{\lambda T} - \frac{c_2}{\lambda T} - 6 = 0 \quad (5.86)$$

解此方程,得

$$\lambda T = 2398 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (5.87)$$

式中, c_2 为第二辐射常数。如果对式(5.85)采用计算机数值解法精确求解,可求得

$$\lambda T = 2410 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (5.88)$$

至此,可以判定光谱辐射对比度仅存在一个极大值,也就是最大值。该最大值存在于 $\lambda_M = 2410/T$ 处。式(5.88)简洁地表达了对温度为 T 的目标,如果想获得最大光谱辐射对比度,就应选择 λ_M 附近的谱带作为红外成像系统的工作波段。

例如,对用于观察常温目标的红外成像系统,常温约 305K,由维恩位移定律,知道其峰值辐射波长为 $\lambda_m = 2897/T = 2897/305 = 9.498 \mu\text{m}$ 。假定某距离上大气传输透过率为 $\tau = 0.66$,常温目标辐射系数 $\epsilon = 0.99$,则目标到达成像系统的辐射温度传递为 $T' = \frac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln(\tau \epsilon)} = 281\text{K}$ 。代入式(5.88),得 $\lambda_M = 2410/T' = 8.57 \mu\text{m}$ 。

因此,8~12 μm 是比较理想的观察波段。如果需要观察高温目标,如以 $Ma = 3$ 速度飞行的某型飞机,其蒙皮温度可达 605K,则 $\lambda_m = 2897/T = 2897/606 \mu\text{m} = 4.78 \mu\text{m}$ 。其表面辐射系数 $\epsilon = 0.9$,同样对 $\tau = 0.66$,经大气传输路程后,有 $T' = \frac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln(\tau \epsilon)} = 548\text{K}$ 。代入式(5.88),得 $\lambda_M = 2410/T' = 4.39 \mu\text{m}$ 。即选用 3~5 μm 的工作波段是合适的。

5.8.4 两个红外波段的实际比较

较高温度的目标在 3~5 μm 波段有很强的辐射。对于侧面或尾追探测时,喷口的尾焰辐射 3~5 μm 波段占总能量的 60%以上,此时蒙皮辐射较小,适于探测空中目标。在南方湿热或大气水分高的地区,3~5 μm 波段优于 8~12 μm 波段。而 8~12 μm 波段适宜于低温干燥的气候条件下工作。从探测的目标特性来考虑,探测超音速导弹,采用 3~5 μm 波段更好;探测亚音速导弹,采用 8~12 μm 波段更好。

对红外系统而言,在光学衍射限制和同一分辨角的情况下,3~5 μm 波段的光学口径要比 8~12 μm 波段小一半,这对降低红外系统的体积与重量有显著的贡献,适装性更强。而且两个波段相同规模的探测器、光学系统的成本价格比较,3~5 μm 波段的价格一般低于 8~12 μm 波段的价格。

正确选择工作光谱通带对充分发挥红外成像系统性能、提高灵敏度至关重要。当然,工作波段的选择,还应充分考虑大气传输窗口及探测对象、工作环境等因素,这里所给出的选择因素只是红外系统设计的基本出发点。值得一提的是,3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段各有优劣,因此从长远来看,采用双波段探测甚至包括短波红外波段探测是发展趋势。

对于 300K 左右的目标(如直升机、飞机和迎头导弹),其蒙皮辐射主要集中在 8~12 μm 波段,这是因为 300K 时辐射的峰值波长为 10 μm ,而且 8~12 μm 波段较宽。这是采用单波段情况下,某型红外系统选取 8~12 μm 波段的主要原因之一。从响应性能考虑,8~12 μm 应选择 MCT 材料。

5.9 红外光学系统无热化设计方法

通常设计一个光学系统只考虑常温条件,这样设计出的光学系统在一般条件下使用是可行的,但是,如果在非常温条件下使用时,其光学性能将会变差。造成这种现象的主要原因是随着环境温度的变化,光学系统中光学元件和支撑该光学元件的机械部件物理性能发生了变化,即存在折射率温度系数和线膨胀系数,从而造成光学系统性能下降。

许多光学系统的工作温度范围较宽,尤其军用系统大多为 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$,甚至更宽,在这个温度变化范围内,光学系统(尤其是红外光学系统)的焦面会随温度变化产生轴向位移,成像质量恶化。因此,

要保证红外光学系统的正常工作,必须消除温度对光学系统的影响(即进行无热化设计),使光学系统能承受较大范围的温度变化,保持其光学性能的稳定。

红外光学系统多用于较为严苛的应用环境中,易受环境温度变化的影响。环境温度的变化不仅可以导致红外光学元件(镜片)的厚度、曲率、面形、折射率、折射率温度系数等发生较大的变化,用于制备镜头的结构材料(铝、钛合金或其他材料)也会发生热胀冷缩的现象。因此,镜片及其外壳材料在温度变化时发生的光学/机械参数的变化共同决定着红外系统像质的变化。这种由于温度变化导致的像质变化称为热差(热像差)。

热差可分为两类:在两种温度下轴上物点成像位置的差异称为位置热像差,而两种温度下因成像倍率不同造成的像的大小的差异称为倍率热像差。

值得指出的是,光学系统的色差是由于透镜介质的折射率随波长的不同而产生的,光学系统的热差主要是由于透镜介质的折射率随温度的不同而产生的,二者产生的原因很相似。而且色差也有位置色差和倍率色差之分,这与位置热像差和倍率热像差很相似。但是,对于热差来说,除对折射率的影响外,它对透镜的曲率、面形以及透镜间的间隔等也会发生影响,所以热差比色差要更复杂,也更难消除。由于热差与色差有一定的相似性,往往可以考虑用一种方法来同时消除这两种像差。

通常认为引起热差的最主要因素是镜片材料的折射率(n)随环境温度(T)变化而发生变化,常用折射率温度系数(dn/dT)来表征这个现象。红外光学材料的折射率温度系数比可见光材料的折射率温度系数大得多。例如,红外光学材料单晶 Ge 的 dn/dT 值为 $3.96 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,而普通(可见光)光学玻璃 BK7 的 dn/dT 值为 $3.60 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (K9 的 dn/dT 值为 $2.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),两者差距约 100 倍,甚至更大。因此,红外光学系统需要有针对性地根据环境温度的变化改进光学设计,解决红外光学系统在温度变化环境中由折射率变化而导致的离焦等像质降低问题。

红外系统的离焦与折射率温度系数的关系(仅考虑此单一因素)可以用式(5.89)表示。

$$df = \frac{f}{n-1} \frac{dn}{dT} dT \quad (5.89)$$

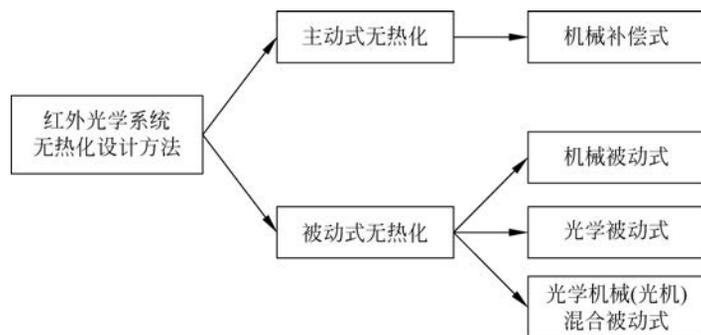
式中, f 为光学系统的焦距; df 为系统焦平面的位移; dT 为系统温度变化。

例如,一个焦距为 200mm,F 数($F/\#$)为 4 的 Ge 镜片,设计波长为 $10\mu\text{m}$,则其由衍射极限决定衍射斑(半径)大小约为 $48.8\mu\text{m}$ 。假设此镜片工作在沙漠环境中,昼夜温差变化为 40°C ,则此系统由温度变化引起的离焦量约为 1mm。此离焦量约为瑞利衍射极限的 20 倍。因此,由温度变化引起的焦面变化是红外光学设计中一个不可忽视的问题。

20 世纪 30 年代,J. W. Perry 等研究人员阐述了温度变化对光学系统的影响,并提出了无热化设计的概念,后经 Jamieson,Rogers 和 Kanagawa 等人的继续研究,特别对于红外系统提出了几种无热化设计方法:机械式无热化设计方法、光学被动式无热化设计方法和机电式无热化设计方法。近 30 年来,人们又提出了折/衍射消热差方法,这种方法是利用光学系统的折/衍射效应实现消热差,它将波动光学理论应用于光学系统的无热化设计中。

光学系统的无热化设计是利用不同手段消除环境温度变化对光学系统性能影响的非热敏化设计,亦即以某种光学、机械或者软件算法的方法消除或者补偿光学系统在一个较大的温度范围内发生热差与像质变化的设计。红外光学系统的无热化设计有不同的分类方法,这里主要分为主动式和被动式两大类,具体如图 5.36 所示。

大多数的无热化设计是通过机械补偿式方法实现高低温补偿,也有一些镜头实现了机械被动式无热化设计,还有一些镜头实现了光学被动式无热化设计。其中,光学被动式无热化设计分为两类:一类



采用多种材料组合与非球面(包括自由曲面)实现,这部分镜头设计大多数都是短焦镜头设计;另一类是对于焦距稍长的系统,大多采用折/衍混合实现,像质良好,在无热化设计方面取得了突破。

主动式无热化方法是在光学系统中外加测温反馈系统和机械调焦机构,主要利用凸轮或者电机来驱动透镜组元或者探测器阵列发生位移以抵消系统在温度变化下发生的离焦量,实现系统成像效果的稳定。主动式无热化方法也常称为机械补偿方法,多用于红外变焦系统的设计。这种方法会造成系统的体积和复杂性变大,使系统的可靠性下降。

被动式无热化方法通过匹配光学材料的 dn/dT 和线膨胀系数以及光学机械材料的线膨胀系数,使各影响因素的温度离焦互相抵消/补偿,使光学系统的成像质量在工作环境温度范围内始终保持可以接受的水平。由于红外光学材料的 dn/dT 是造成离焦的主要因素,因此,被动式无热化方法需采用多种红外光学材料,有时还需要借助特殊结构才能实现。

被动式无热化设计方法又包含光学被动式无热化设计方法、机械被动式无热化设计方法以及光学机械(光机)混合式无热化设计方法。机械被动式和光机被动式无热化设计方法都需要使用特殊的机械结构来控制热差,系统结构较为复杂,而且在使用过程中易发生机械故障。光学被动式无热化方法是利用光学材料在温度特性上的差异,通过对具有不同折射率温度系数的光学材料进行适当组合,使光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互补偿,从而将系统的离焦量控制在允许范围内的。光学被动式无热化设计方法则使无热化光学系统抛弃了对精密机械机构的依赖,使其具有结构简单、灵活紧凑、尺寸较小、重量较轻、成本较低、系统可靠性好以及不需要供电、不引入运动部件等优点,其综合效率最高,因此受到了人们普遍重视。光学被动式消热差设计是目前定焦红外光学系统设计的主要方法。

在各种红外系统的无热化设计方法中,硫系玻璃在一种被称为坐标法的光学被动式无热化设计中的应用具有一定的独特性。

坐标法无热化设计,首先需要根据红外材料的热差系数(θ)、色差系数(ω)分别为直角坐标系的 x 、 y 轴绘制红外材料的“热差~色差”($\theta\sim\omega$)图。色差系数为色散引起的光焦度的相对变化,数值上等于材料阿贝数的倒数。不同的红外材料根据其热差、色差系数的不同在“热差~色差”图中表现为位置离散点。根据材料在“热差~色差”图中的位置关系选择两种或多种不同材料制备镜片,通过调整各个镜片的光焦度及其在光轴上的位置,可以使整个红外光学系统由于温度变化产生的像面离焦量与镜筒材料热胀冷缩产生的像面离焦互相抵消,实现光学系统在温度变化的环境中成像位置基本不变,以及成像质量相对稳定的目的。坐标法可以提高红外光学系统无热化的设计效率,并降低光学设计的计算复杂度。目前,已有许多科技人员采用这种方法设计了种类众多的无热化红外镜头。

如果无热化系统由 i 个镜片组成,则坐标法无热化设计要求各个镜片的光焦度、色差系数和热差系

数应满足以下要求。

各镜片光焦度满足：

$$\frac{1}{h_1} \sum_i (h_i \cdot \varphi_i) = \varphi \quad (5.90)$$

各镜片色差系数满足：

$$\left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_i (h_i^2 \cdot \omega_i \cdot \varphi_i) = 0 \quad (5.91)$$

各镜片热差系数满足：

$$\left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_i (h_i^2 \cdot \theta_i \cdot \varphi_i) = \alpha_m L \quad (5.92)$$

$$\omega_i = \frac{1}{n_i - 1} \frac{dn_i}{d\lambda} \quad (5.93)$$

$$\theta_i = \alpha_i - \frac{1}{n_i - 1} \frac{dn_i}{dT} \quad (5.94)$$

式中, h_1 为第一近轴光线在第一片镜面的入射高度; h_i 为第一近轴光线在第 i 片镜面的入射高度(如果透镜组为密接型,可忽略镜片厚度引起的相邻镜片间高度差异); φ_i 、 ω_i 、 θ_i 分别为第 i 镜片组的光焦度、色差系数和热差系数, θ_i 未考虑镜筒随温度的变化,即未考虑其结构材料的线膨胀系数; n_i 为第 i 片镜的折射率; α_i 为第 i 片镜的线膨胀系数; α_m 为镜筒的线膨胀系数; L 为镜筒结构件的长度(光学系统的总长度)。 φ 为系统光焦度。

以 θ 、 ω 分别为 x 、 y 轴即可绘制红外无热化设计的“热差~色差”图,可以直观地衡量各种红外材料的热差和色差性能,如图 5.37 所示。不同的材料根据其 θ 、 ω 值的大小可在“热差~色差”图中标注各自相应的位置。由图 5.37 可见,常规红外材料多分布于“热差~色差”图的中部位置,在右上角以及左下角缺少更多的材料选择。进行无热化设计时,首先选择在“热差~色差”图中可构成三角形的三种不同的红外材料。这种在“热差~色差”图中构成的三角形通常称为无热化三角形。根据 Tama-gawa 等提出的理论,无热化三角形的形态、位置和面积的大小决定了所选择材料组合的无热化光学性能,面积大且饱满的三角形的无热化性能优于小且扁平的三角形的性能。

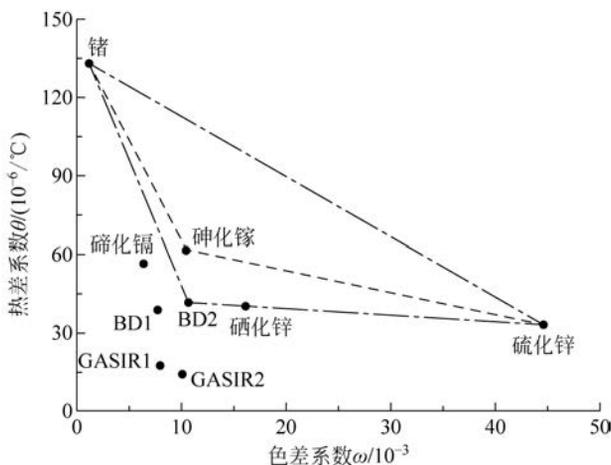


图 5.37 多种红外材料在 8~12 μm 波段的 $\omega \sim \theta$ 图

图 5.37 中, $\text{BD1}(\text{Ge}_{33}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{55})$ 、 $\text{BD2}(\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60})$ 为 Light Path 公司的硫系玻璃产品; $\text{GASIR1}(\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58})$ 、 $\text{GASIR2}(\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65})$ 为 Umicore 公司的硫系玻璃产品。可见, 硫系玻璃都位于“热差~色差”图的左下角。根据红外材料在图 5.37 中的位置, 通常可选择 Ge 和 ZnS 这两种分别位于左上角以及右下角且距离较远的材料进行无热化设计。第三种材料可以选择位于左下角的材料以形成面积较大的无热化三角形。从这个设计思路看, 硫系玻璃的出现进一步丰富了“热差~色差”图在左下角的材料选择, 有利于进一步产生更大的无热化三角形。例如, 在图 5.37 中标记了由 Ge、ZnS 与硫系玻璃 BD2 组成的无热化三角形(点画线三角形)和由 Ge、ZnS 及砷化镓组成的无热化三角形(点线三角形)。明显可见, 利用点画线三角形所包含的红外光学材料进行无热化设计的性能, 将有可能优于选用点线三角形所包含的红外光学材料进行无热化设计的性能。

5.10 系统总体对红外传感器提出的功能及性能指标要求

系统总体对红外传感器提出的功能及性能指标要求具体如下。

5.10.1 主要功能

红外传感器的主要功能包括: ①接收目标与背景的红外辐射, 并将其转换成电信号; ②二次稳定(陀螺稳定反光镜); ③电子滤波及 A/D 转换; ④ NUC; ⑤ 疵点消除; ⑥ 合成排序、并行信号输出及长线传输; ⑦ 自检。

5.10.2 红外传感器的性能

红外传感器的性能指标包括: ①目标特性, 包括运动状态、辐射强度、目标面积; ②环境条件, 包括环境温度、相对湿度、能见度; ③红外传感器运动状态; ④探测距离; ⑤信噪比; ⑥信号响应的非均匀性、信号带宽、信号传输距离; ⑦二次稳定精度; ⑧可靠性、维修性; ⑨连续工作时间、间歇时间、启动时间; ⑩红外传感器的重量、几何尺寸(长、宽、高); ⑪其他。

5.11 红外传感器的工作原理与组成

红外传感器的工作原理与组成具体如下。

5.11.1 红外传感器的工作原理

目标与背景的红外辐射经物镜后, 成像在探测组件的焦平面上, 红外探测组件将红外辐射转换成电信号, 通过红外信号预处理电路, 对红外信号经相关双采样(Correlated Double Sample, CDS)、电子滤波、A/D 转换后, 进行 NUC、疵点消除与合成排序, 经一定距离传输线以并行数字信号输送到目标处理单元进行下一步处理。

5.11.2 红外传感器的组成

红外传感器由物镜(红外光学系统)、红外探测组件、红外信号预处理电路、二次稳定装置和控制与通信电路组成, 其组成框图如图 5.38 所示。

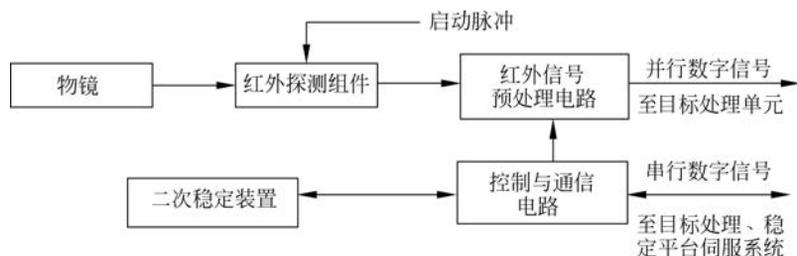


图 5.38 红外传感器组成框图

1. 物镜

红外传感器的物镜对成像质量和光学效率的要求都很高,经典的光学设计难以保证物镜的光学效率要求,因此要采用非球面设计,将物镜设计为非球面的透射式光学系统。设计上采用多种材料校正工作波段内的色差。

2. 红外探测组件

某红外探测组件由以下 4 部分组成:

- (1) ID TL005 288×4 LWIR IDDCA 组件。
- (2) 探测器时钟脉冲发生电路:产生保证探测器正常工作所需的脉冲信号。
- (3) 探测器偏压电路:产生探测器正常工作所需的偏置电压。
- (4) 启动脉冲发生电路:探测器 CCD 读出电路的启动脉冲信号由测角系统产生,启动脉冲到来后,时钟脉冲发生电路即产生 CCD 所需的脉冲信号。

3. 红外信号预处理电路

红外信号预处理电路的组成框图如图 5.39 所示。

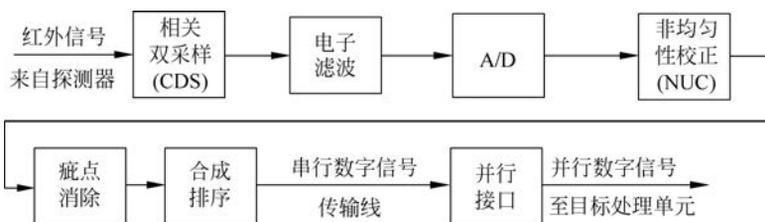


图 5.39 红外信号预处理电路的组成框图

- (1) 相关双采样(CDS):对探测器输出的信号进行 CDS,滤除探测器读出电路产生的开关噪声。
- (2) 电子滤波:滤除低频噪声,抑制高频噪声,提高信噪比。
- (3) A/D:对红外信号进行模拟量/数字量转换,量化等级为 12bit。
- (4) 非均匀性校正(NUC):对探测器 288 个通道中每一通道的输出信号逐一进行校正,以保证在相同的红外辐射能量作用下,各个通道所产生信号的非均匀性 $\leq 0.5\%$ 。对于线性响应的探测器,进行响应度和偏置点两点校正;对于非线性响应的探测器,需要采用多点分段线性逼近的算法进行校正。由于某型红外系统需覆盖 360° ,不可能把温度基准装入系统中,通过对两点、多点分段线性逼近和基于场景的非均匀性校正进行研究,工作情况良好,于是研制可执行这三种算法的通用硬件。
- (5) 疵点消除:用疵点邻域的两个非疵点通道的信号平均值替代疵点信号,实现疵点消除。
- (6) 合成排序:使前一列信号延迟相当于相邻两列间隔的时间,两列信号复合处理后形成一列信号,完成合成排序。

(7) 并行接口: 以并行方式向目标处理单元输出数字红外信号、像素同步信号和列同步信号, 同时接收来自测角单元的列同步信号。

4. 控制与通信电路

控制与通信电路完成以下功能:

(1) 接收来自目标处理单元的控制信号(包括均匀性校正控制信号、自检控制信号、增益控制信号), 向目标处理单元发送自检结果信号。

(2) 接收来自稳定平台伺服系统的平台姿态信号。

(3) 控制二次稳定装置。

(4) 控制红外信号预处理电路。

5. 二次稳定装置

二次稳定装置由反射镜、陀螺、伺服电机和驱动电路组成, 其功能是对红外光轴进行二次精稳定。

5.12 红外探测器件及物镜光学参数选取

红外探测器件及物镜光学参数具体选取如下。

5.12.1 红外探测器组件的选取

考虑到某红外系统对红外器件的具体使用要求, 在系统研制时选用 4N 型红外探测器件。该探测器不但性能良好, 而且在市场上可以采购到。由于该探测器采用延时积分技术, 将 4 个像元的信号积累起来, 信噪比增大 2 倍, 从而使器件的探测灵敏度和响应率都有很大的提高, 也补偿了该器件因工作波段(7.7~10.3 μm)变窄而产生的不足。经过对比分析, 同时借鉴同类红外系统红外传感器的研制经验, 选用某公司生产的 288 元 \times 4 元 TDI 焦平面红外探测器组件, 组件型号为 ID TL005, 红外探测组件的排列方式如图 5.40 所示。它是一种集成化的红外探测器——杜瓦——微致冷器组件(IDDCA)。

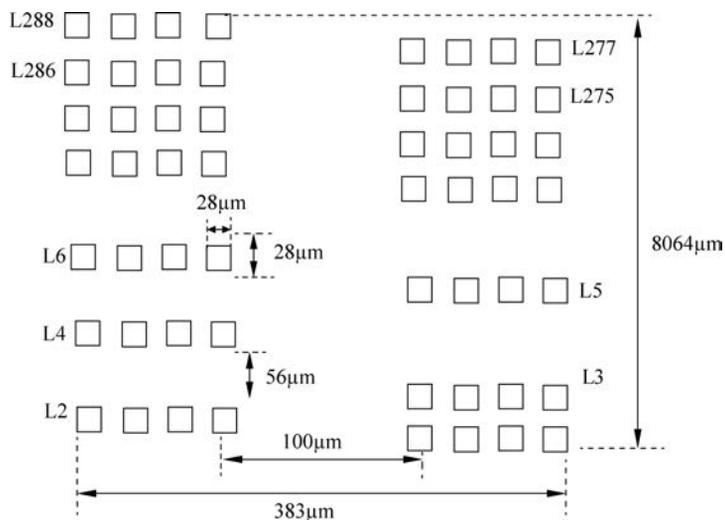


图 5.40 红外探测组件的排列方式

ID TL005 型 288 元×4 元长波红外探测器组件的主要性能指标如表 5.4 所示。

表 5.4 ID TL005 型 288 元×4 元长波红外探测器组件的主要性能指标

参 数	说 明
波段/ μm	7.7~10.3
单元尺寸($a \times b$)/($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	25×28
像元数	288×4
平均峰值探测率 $D_{a_p}^*$ /($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	$\geq 1.5 \times 10^{11}$
致冷方式	直线驱动斯特林闭路循环致冷
致冷器启动时间/min	≤ 10 (@20℃)
工作温度	-54~+71℃
MTBF/h	>3000h(按 MIL-STD-781-C 标准)
杜瓦保真空时间/年	>10
质量/kg	<1.4

5.12.2 物镜光学系统的设计考虑及参数选取

该物镜光学系统的设计考虑及参数选取如下。

1. 物镜光学系统的设计考虑

一般来说,红外光学系统的设计与可见光系统的设计从根本上并没有什么区别。主要考虑: F 数、视场、焦距、有效口径、透过率、像差和红外光学材料。此外还必须满足冷屏效率、镜像效应以及选用的绝热方法等条件。同时还必须决定是使用折射还是反射光学系统,并对非球面和/或衍射光学系统等的采用做出决定。

适用于红外系统的光学材料有多种,包括:硫化玻璃、碱金属卤化物和电解质。其中最常用的材料有硅、锗、硒化锌和硫化锌。满足野外使用的特性:折射率要高,色散和吸收率要低,要与防反射膜适配,折射率的热系数应低,应具有较高的表面硬度和机械强度高,无水溶性等。由于它们的折射率高,界面反射损失大,所以每面应镀增透膜。

2. 物镜光学系统的参数选取

物镜光学系统的参数选取包括视场 θ 、物镜焦距 f' 、物镜口径 D_0 、物镜的总透过率 K 、点弥散圆的线直径 d 。

1) 视场

某型红外系统研制中要求系统高低视场 $\theta \geq 4^\circ$,因此实际设计中选取物镜视场为 $\theta = 4.2^\circ$ 。

2) 物镜焦距

由图 5.40 可知,探测器的总线度 $L = 8.064\text{mm}$,则 $f' = \frac{L/2}{\tan(\theta/2)} = 109.96\text{mm}$,取整为 $f' = 110\text{mm}$ 。

3) 物镜口径

物镜口径的大小对作用距离的影响很大,大口径的物镜能较大地提高作用距离。但从光学设计来讲,如果物镜的 F 数取得过小,不仅设计加工难度大,而且要增加镜片数量,降低光学透过率。因此,综合各个因素考虑,物镜系统选取 $F_{\text{数}} = 1$,于是 $D_0 = f'/F_{\text{数}} = 110\text{mm}$ 。

4) 物镜的总透过率

国外的红外光学透镜单片的透过率可高达 99%以上,国内可达 98%以上,通过采用非球面设计,物

镜的总透过率可达 $K \geq 95\%$ (在 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ 波长范围内)。

5) 点弥散圆的线直径

弥散圆的大小不仅对信号有相当大的影响,而且对成像的清晰度有很大的影响。当 $\lambda = 9 \mu\text{m}$ 时, $d = 2.44\lambda F_{\text{数}} = 21.96 \mu\text{m}$, 弥散圆线直径 d 值小于像元尺寸 $25 \mu\text{m}$, 表明物镜参数的选取是正确的。

5.12.3 物镜的温度补偿

由于大多数的红外材料(特别是锗)的 $\frac{\partial n}{\partial T}$ (折射率温度系数)很高,所以热效应是红外系统的固有特性。此外,大多数红外系统的使用环境中的极限工作温度常常不低于 $-20 \sim +40^\circ\text{C}$, 因此,需考虑到折射率随温度变化而对成像系统的影响。单个薄透镜在空气介质中的热散焦(离焦) δ 由式(5.95)求出:

$$\delta = \left(\alpha f + \alpha_m L - \frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T \quad (5.95)$$

式中, α 为折射介质的热膨胀系数; f 为焦距; α_m 为透镜框的热膨胀系数; L 为透镜系统的总长度; n 为透镜的折射率; ΔT 为温度变化。

然而,在光学系统设计中,多透镜组的热效应更加复杂。如果 δ 大于系统的焦深,则必须考虑补偿。可采用主动的也可采用被动的绝热法。可用的方法有: ①采用手动调焦; ②自动机电调焦; ③利用有效的 $\frac{\partial n}{\partial T}$ 值为 0 的组合透镜材料对透镜绝热; ④利用具有不同热扩散系数的透镜框使光学系统反向胀缩来补偿散焦对透镜绝热; ⑤使用衍射光学系统实现被动绝热。

由此分析可知,某型红外系统将在较宽的温度范围内 ($-30 \sim +65^\circ\text{C}$) 工作,而温度的变化对红外光学材料的特性有一定的影响,导致物镜光学系统焦面漂移。因此,要使设备满足工作环境温度的要求,使设备能在各温度条件下正常工作,就应该对物镜光学系统进行温度补偿。

目前国内外普遍采用的物镜光学系统的温度补偿(无热化)技术有三种方式,即机械温度补偿、电动温度补偿及自动温度补偿。图 5.41 是一个自动温度补偿红外光学系统示意图,利用在硫系镜片上加工出二元衍射面(衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE))进行色差校正,同时利用硫系玻璃的低折射率温度系数,可不需要进行额外的无热化机械设计。

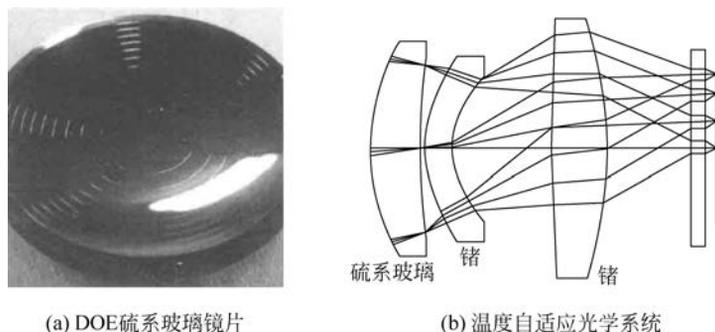


图 5.41 自动温度补偿红外光学系统示意图

鉴于红外传感器安装部位的特殊性以及对其体积、重量的严格要求,选用电动温度补偿方法进行物镜的温度补偿是合理可行的。即当红外光学系统工作的环境温度发生变化时,按一定关系通过移动其中的透镜,实现红外光学系统的热不敏,保证整个红外光学系统在环境温度发生变化时,依然具有较高的传递函数。