

5.1 红外热成像技术

5.1.1 红外热成像概述

红外热成像是一种基于对物体的红外辐射进行探测和成像的技术。由于所有物体都会根据温度的不同发出不同强度的红外线,因此红外热成像技术能够显示出物体表面的温度分布,从而提供关于物体热状态的信息。

红外热成像技术在军事、工业、汽车辅助驾驶、医学等领域有广泛的应用。例如,在军事领域,红外热成像技术可以用于夜间侦察和目标识别;在工业领域,红外热成像技术可以用于设备的热状态监测和故障预测;在医学领域,红外热成像技术可以用于人体的热状态监测和疾病诊断。

红外热成像技术也存在一些局限性。例如,红外图像的对比度和分辨率通常较低,视觉效果较差;同时,红外热成像仪的价格也相对较高,限制了其在某些领域的应用。

红外热成像技术具有以下优势。

(1) 非接触。红外热成像技术无须与目标物体接触,通过测量目标物体的红外辐射获取其温度信息,可在远距离和复杂环境中进行测量。

(2) 高灵敏度。红外热成像技术可以检测到微小的温度变化,适用于许多应用场景,如电气设备故障检测、建筑结构检测等。

(3) 快速。红外热成像技术能够快速获取目标物体的温度分布图像,适用于动态场景的监测和分析。

总的来说,红外热成像技术通过感测物体的红外辐射,实现了对目标物体温度分布的非接触式测量和成像,具有广泛的应用前景,在工业、建筑、医疗、军事等领域均有重要应用。

5.1.2 红外热成像原理

红外热成像的基本原理基于热辐射物理学,即所有物体温度大于绝对零度时都有红外辐射。这种辐射波长通常为 $0.7\sim 1000\mu\text{m}$,其中 $2\sim 14\mu\text{m}$ 的红外波段被广泛应用于热成像技术。

以下是红外热成像的基本原理。

(1) 红外辐射。任何高于绝对零度的物体都会产生红外辐射,尤其在环境温度下,绝大



第8集
微课视频

部分的红外辐射出现在波长 $3\mu\text{m}$ 以上的光谱区域。然而,并非所有波段的红外辐射都在大气中表现出良好的透过性。研究指出,红外光在大气中透过率较高的波段主要包括近红外区域(低于 $2.4\mu\text{m}$ 的一些波段)、中波红外(波长为 $3\sim 5\mu\text{m}$)、长波红外(波长为 $8\sim 14\mu\text{m}$)。根据黑体辐射定律,物体的温度越高,其红外辐射能量越大。

(2) 传感器。红外热成像设备通常配备有红外探测器,这些探测器能够感知并测量物体的红外辐射。

(3) 图像重建。探测器接收到的红外辐射信号被转换为数字信号,并通过图像处理算法进行处理,最终生成热成像图像。

红外热成像利用红外探测器和光学成像物镜接收被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,从而获得红外热像图,这种热像图与物体表面的热分布场相对应。通俗地讲,红外热成像就是将物体发出的不可见红外能量转换为可见的热图像。热图像中不同颜色代表被测物体的不同温度。红外热成像系统构成如图 5-1 所示。

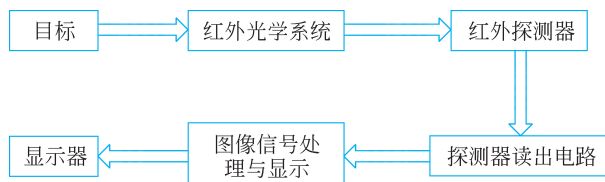


图 5-1 红外热成像系统构成

1. 红外光学系统

红外光学系统主要负责接收物体辐射能量,通过光学和空间滤波,将景物的辐射热图聚焦到探测元件的焦平面上。目前常用的红外光学系统主要有反射式、折射式和全透式等,其透过材料主要有锗、硅和氟化镁等。由于探测器尺寸较小,系统的瞬时视场也相应较小,一般为毫弧度(mrad)数量级。为了实现对径向、纬向数十度的物面成像,需要借助扫描器以瞬时视场为单位,通过连续分解图像的方法,移动光学系统,从而实现大视场成像。

2. 红外探测器

红外探测器负责将目标的红外辐射转换为电信号,并通过信号处理形成热图,实现目标热分布的成像。红外探测器在现代热成像设备中得到广泛应用,特别是光子探测器,主要使用基于窄禁带半导体材料的设备,其中以 HgCdTe (汞镉碲)材料居多。这类材料受到关注的原因主要在于其具有优良的红外探测特性,能够在红外波段范围内高效地转换红外辐射为电信号,而且通过调整材料中 CdTe 和 HgTe 的组分比例,可以灵活调整其工作波段,以适应不同的红外辐射频段和应用需求。

在选择探测器时,理论上应优先考虑高探测率,同时对探测器的响应时间有一定要求,应保持不低于瞬时视场在探测器上的驻留时间。此外,为了获得良好的传输效率,探测器的输出阻抗需要与后续电路的参数相匹配。至于制冷方面,要求工作温度不能过低,制冷量也不能过大。

3. 信号处理系统

在热像仪中,红外探测器的输出信号通常非常微弱,需要通过充分的放大和处理才能进行显示。

当使用多元探测器列阵时,原则上应具有与列阵元件数相等的信号通道数。然而,出于

对成本、尺寸和质量的考虑,实现这一点较为困难。一种可行的解决方案是使用时间分配多路传输器。近年来,新的固态开关技术的发展已用于光电导探测器的低电平开关系统中。随着探测器性能的提升,热像仪信号处理变得越来越简单。

4. 显示系统

通过红外探测器捕捉到的红外辐射信息以图像的形式呈现给用户,显示系统进一步处理来自信号处理电路的数据,进行数字信号处理,如调整对比度、亮度、增强图像细节等,以优化显示效果。显示屏使用液晶显示(LCD)或有机发光二极管(OLED),用于显示经过处理的红外图像,高分辨率和高对比度的显示屏提供清晰、真实的热图。用户界面提供控制和交互的方式,包括按钮、触摸屏、遥控器等。用户可以通过界面进行模式切换、设置参数、调整图像显示等操作。视频输出接口允许将红外图像传输到外部设备,如计算机、监视器或记录仪上,以进行进一步分析、存储或共享。有些系统支持将红外图像与可见光图像叠加,提供更全面的信息,使用户能够直观地对比两者。部分热成像仪采用头戴式显示器或热成像眼镜,将红外信息投影到用户的视野中,实现更灵活的观察方式。

5.1.3 红外探测器

红外探测器是根据物质与红外辐射相互作用所呈现出的物理效应探测红外辐射的器件。红外探测器按工作原理主要可分为红外探测器、微波红外探测器、被动式红外/微波红外探测器、玻璃破碎红外探测器、振动红外探测器、超声波红外探测器、激光红外探测器、磁控开关红外探测器、开关红外探测器、视频运动检测报警器、声音探测器等许多种类。此外,还可以根据探测范围、响应波长、工作温度等特性进行分类。

根据探测范围的不同,红外探测器可以分为点控红外探测器、线控红外探测器、面控红外探测器和空间防范红外探测器。

根据探测器响应波长的不同,红外探测器可以分为近红外、短波红外、中红外、长波红外和远红外探测器。

根据工作温度的需求不同,红外探测器可以分为制冷型红外探测器和非制冷型红外探测器。

根据探测原理的不同,红外探测器又可分为光子红外探测器和热红外探测器。光子红外探测器利用半导体材料中的光电效应,将红外辐射转换为电信号。热红外探测器则基于红外辐射对材料的热效应。

总的来说,红外探测器的种类繁多,各有其特点和适用场景。在实际应用中,需要根据具体的使用情况和安全防范要求,合理选择不同类型的红外探测器。

1. 光子红外探测器

光子红外探测器采用半导体材料制造。吸收光子后,电子从半导电状态上升到导电状态,激发非平衡载流子(电子或空穴),引起电学性能变化。光子红外探测器的工作原理与探测器材料有关,可分为本征型和非本征型。在本征型材料中,每吸收一个光子即产生一个电子空穴对,携带正负电荷;而在非本征型材料中,产生的电荷为正或负,不会同时产生两种载流子,称为内光电效应。光子红外探测器主要包括光导型和光伏型,另外还有量子探测器等。



2. 热红外探测器

热红外探测器的运作方式如下：当热探测器接收入射辐射时，半导体材料温度变化，从而导致器件的某一物理参数发生变化，并产生可测量的输出信号。这类探测器通常在室温下工作，主要包括测辐射热计、温差电偶、气动探测器和热释电探测器 4 种类型。

测辐射热计是根据材料电阻或介电常数对辐射引起的温升变化进行探测的。其中，半导体具有较高的温度系数，因此电容式和电阻式是主要的测辐射热计类型。电容式测辐射热计通过材料介电常数与温度关系感知热辐射，但由于其温度系数不足以大规模制备和使用，因此电阻式测辐射热计更为普遍。电阻式测辐射热计在吸收红外辐射时产生温度变化，其电阻随之变化，形成电路中的输出信号。这些探测器通常包括金属、半导体和超导体类型，其中金属电阻线性变化，而半导体电阻则随温度升高而下降，呈指数关系。半导体测辐射热计通常被称为“热敏电阻”。

近年来，随着高温超导材料的研发，超导探测器备受关注。这类探测器分为两种，一种利用在转变温度附近电阻急剧变化的效应进行测辐射热计；另一种采用由两个超导体构成的约瑟夫森结，红外辐射导致超导带隙的变化，进而影响电流关系。倘若室温超导变为现实，这将是 21 世纪最引人注目的探测器技术。

热释电探测器基于热释电效应，其灵敏元件在接收红外辐射后迅速升温，快速的温度变化会引起晶体的自发极化强度发生变化，进而表面电荷发生变化。将这一器件接入电路中，可形成电信号。采用优异的热释电性能的材料主要包括铁电体晶体，如钛酸锂(LiTiO_3)、铌酸锶钡(SBN)、硫酸三甘肽(TGS)和聚合物(PVDF)等。后来，更为先进、易于制备和控制的铁电氧化物陶瓷材料得到发展，如碱性锆酸铅陶瓷(PZ)、钛酸锶钡(BST)。由于热释电探测器的响应速度较快，因此在红外探测器领域占据着重要地位。

热释电探测器无须制冷(超导除外)，易于使用、维护，具有良好可靠性。它们为无选择性探测器，光谱响应与波长无关，制备工艺相对简易，成本较低。然而，其灵敏度较低，响应速度较慢，主要受热绝缘设计的影响。

3. 红外探测器的发展

红外探测器的发展历程可以追溯到 20 世纪初，经过多个阶段的演进和技术突破。红外探测器的发展历程以及当前的发展趋势如下。

(1) 早期发展(20 世纪初至 20 世纪 50 年代)。早期的红外探测器主要基于热释电效应，使用铋金属等材料制成，对红外辐射的响应较为有限。这些探测器主要用于热成像和测温等应用。

(2) 热探测器时代(20 世纪 50 年代至 20 世纪 70 年代)。热探测器的引入标志着红外探测技术的重大进步。其中，铅盐探测器(如铅硒(PbSe)、铅碲(PbS)等)成为主流，实现了在不同波段的红外探测。

(3) 半导体红外探测器的兴起(20 世纪 70 年代至 20 世纪 90 年代)。半导体红外探测器(如硒化铟(InSb)和汞镉碲(HgCdTe)等)逐渐取代了热电探测器，具有更高的灵敏度和更广泛的波段覆盖。这一时期还见证了探测器制造技术的改进，实现了更小型化、更灵活的红外系统。

(4) 多元化技术应用(20 世纪 90 年代至今)。随着技术的发展，红外探测器在军事、医疗、工业和消费电子等领域得到广泛应用。探测器的分辨率、灵敏度和速度等不断提高，同

时在制造上实现了更高效的生产。

(5) 光子探测器和新型材料。光子探测器,如量子阱探测器(QWIP)等,以及新型红外材料的研究推动着红外探测技术的进一步发展。光子探测器在光谱选择性、高温操作等方面具有优势,能够应对更多的应用需求。

(6) 集成技术和智能化应用。当前的趋势包括将红外探测技术与集成电路技术相结合,实现更小型化、低功耗、智能化的红外系统。这种集成有助于推动红外技术在自动驾驶、人脸识别、智能安防等领域的广泛应用。

5.2 红外热像仪

5.2.1 红外热像仪概述

红外热像仪是一种能够测量物体表面温度并生成对应温度分布图像的设备。它利用物体的红外辐射反映其温度,通过检测不同温度的辐射并将其转换为可见图像,使用户能够直观地看到物体表面的温度差异。

1. 红外热像仪的构成

- (1) 接收和汇聚景物红外辐射的红外光学组件。
- (2) 既实现红外望远镜大视场与红外探测器小视场匹配,又按显示制式的要求进行信号编码的光学机械扫描器(当使用探测元数量足够多的红外焦平面探测器时,光学机械扫描器可以省去)。
- (3) 将热辐射信号转换为电信号的红外探测器组件。
- (4) 对电信号进行处理的电子学组件。
- (5) 将电信号转换为可见光图像的显示器。
- (6) 进行信号处理的算法和软件。

2. 红外热像仪的技术优点

- (1) 非接触性测温。能够在不接触目标物体的情况下测量其表面温度,适用于对温度敏感性高的物体或远距离目标的监测。
- (2) 实时成像。能够即时生成热图像,提供对温度分布的实时视觉呈现,有助于快速识别问题或异常。
- (3) 适用于暗光环境。在光照较差的环境或夜间,仍能够可靠工作,因为其基于红外辐射而不受可见光条件限制。
- (4) 广泛应用领域。在电力、建筑、医学、军事等领域有广泛应用,用于检测热异常、提高安全性和监测环境变化。
- (5) 高灵敏度。能够探测微小温度变化,使其对于一些需要高灵敏度的应用场景特别有效。
- (6) 避免污染。不需要直接接触目标物体,因此不会引起交叉污染或影响被测物体的状态。

3. 红外热成像系统分类

- (1) 扫描型红外热成像系统:通过机械或电子扫描获取场景信息,适用于大范围区域的监测。



第9集
微课视频



(2) 凝视型红外热成像系统：通过固定的视场感测器，实时捕捉整个场景的图像，常用于追踪移动目标。

(3) 制冷型热像仪：内置制冷系统，用于提高探测器的灵敏度和性能。

(4) 非制冷型热像仪：无制冷系统，更轻便，成本更低，适用于一些不需要极高性能的应用。

(5) 长波、中波、短波红外热像仪：根据波长范围的不同，适用于不同应用场景。

(6) 双波段红外热像仪：同时工作于两个不同的红外波段，提供更全面的信息。

(7) 多波段红外热像仪：能够在多个波段进行工作，增强系统对不同目标的观测能力。

(8) 平台观瞄型热像仪、便携式热像仪、制导型热像仪：针对不同使用场景和需求设计的热像仪类型。

4. 红外热像仪探测距离

红外热像仪的探测距离受到多种因素的影响，包括环境条件、目标表面反射率、气溶胶浓度、热像仪的分辨率和技术、环境温度以及目标的表面材质等。

在理想的条件下，红外热像仪可以探测到几百米甚至几千米外的热源。然而，在实际应用中，由于各种因素的影响，探测距离通常在几十米到数百米。如果目标足够大且热像仪的分辨率足够高，那么可以在较远的距离识别目标。但如果目标很小或热像仪分辨率不够高，那么即使探测到了热源，也可能无法识别出目标的形状和特征。

5. 红外热像仪工作模式

根据扫描方式，红外热像仪可分为 3 种类型：光机扫描、电扫描（包括固态自扫描和电子束扫描），以及光机扫描+电扫描。

根据多元探测器的排列方式以及与光机扫描的协调配合，红外热像仪可分为串扫型热像仪、并扫型热像仪，以及串并扫型热像仪。

5.2.2 红外热像仪设备性能参数

常见的红外热像仪设备性能参数如下。

(1) 分辨率。分辨率是红外热像仪设备能够分辨的最小物体间距或温度差异的能力。高分辨率的红外热像仪设备可以捕捉到更多的细节和温度变化，从而提高图像的清晰度和准确性。

(2) 灵敏度。灵敏度是红外热像仪设备对红外辐射的响应能力。高灵敏度的系统能够更准确地检测到较弱的红外辐射信号，从而提高图像的对比度和清晰度。

(3) 噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)。NETD 是评估红外热像仪设备性能的关键参数之一，它表示系统能够检测到的最小温差。NETD 值越小，系统的测温精度越高，图像质量也越好。

(4) 动态范围。动态范围指红外热像仪设备能够测量的最大和最小温度之间的差异。较宽的动态范围意味着系统能够覆盖更大的温度范围，并在图像中显示更多的细节和温度变化。

(5) 帧频。帧频指红外热像仪设备每秒可以捕捉和显示的图像帧数。高帧频可以提高系统的实时性能，使其更适合于动态场景的观察和监测。

这些参数共同决定了红外热像仪设备的整体性能，包括图像的清晰度、准确性、测温精度和实时性等。

5.2.3 红外热成像典型器件

1. 红外热成像器件介绍

(1) 红外热像仪。图 5-2 所示为美国福禄克(Fluke)公司的 Ti450 PRO 型红外热像仪,分辨率为 640×480 像素,具有热成像和可见光相机的双重功能,采用 Fluke 专利的 MultiSharp 焦平面阵列技术,可以在不同焦距下实现自动对焦,具有 1200°C 的测温范围,配备 Fluke Connect 无线连接功能,可将实时图像传输到智能设备上。

(2) 红外扫描仪。图 5-3 所示为海康威视公司生产的 DS-2TD1217-x/PA 型红外扫描摄像头,配备红外热像传感器,能够生成热图像,显示目标物体表面温度分布情况,支持智能温度测量功能,能够远距离实时测量人员的体温。



图 5-2 福禄克 Ti450 PRO 型红外热像仪



图 5-3 海康威视 DS-2TD1217-x/PA 型红外扫描摄像头

2. 改进的红外热成像技术

(1) 红外探测器技术改进。图 5-4 所示为 FLIR T1K 红外热成像相机,采用纳米技术和微电子加工技术制备的红外探测器,具有低噪声水平和高信噪比、更高的灵敏度和更快的响应速度,分辨率为 1024×768 像素,温度测量范围为 $-40 \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 光学系统优化。图 5-5 所示为 FLIR A400/A700 系列红外热成像相机镜头,针对透镜和反射镜进行了设计和加工工艺的优化,加装了红外滤波器,以屏蔽可见光,提高光学质量和成像性能。

(3) 图像处理和算法优化。图 5-6 所示为 AXIS Q1942-E 型红外热成像摄像头,在红外热成像图像处理中应用了深度学习技术,在温度测量中采用了自适应温度测量算法。



图 5-4 FLIR T1K 红外热成像相机



图 5-5 FLIR A400/A700 系列红外热成像相机镜头



图 5-6 AXIS Q1942-E 型红外热成像摄像头