

红外图像处理技术 之红外成像系统

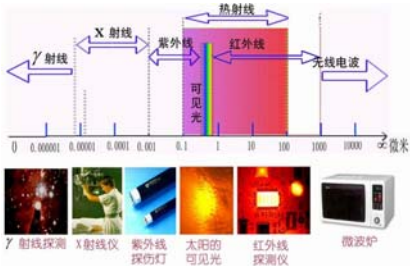
航空航天学院
陆哲明/郑阳明

内容

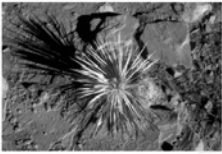
- 5.1 概述
- 5.2 红外成像系统的工作原理和结构
 - 5.2.1 红外成像系统的工作原理
 - 5.2.2 红外成像系统的类型和组成
 - 5.2.3 红外成像系统基本参数
- 5.3 红外光学系统
- 5.4 红外探测器

5.1 概述

- 红外成像系统将物体自然发射的**红外辐射**转变为可见的红外图像，从而使眼视觉范围扩展到红外区。



- 近年来，红外图像的质量已经达到黑白电视的水平，这些图像的静态照片可以与高质量的黑白照片媲美。



植物和岩石黑白红外线图像，新墨西哥州



欧洲天文台发布迄今最详细的恒星育婴室红外图像

- 红外图像技术把目标与场景各个部分的**温度分布（发射率，真实物体的辐射能量与同温下的黑体的辐射能量之比）、反射率（投射到物体上面被反射的辐射能与投射到物体上的总辐射能之比）**差异转变为相应的信号，再转为可见光图像。这种把不可见红外辐射转换为可见光图像的装置被称为**红外热像仪**。

物质	发射率	物质	发射率
沥青	0.90 to 0.95	布（黑色）	0.90
混凝土	0.94	人体皮肤	0.90
冰面	0.96	肥皂沫	0.75 to 0.90
砂子	0.90	木炭（粉末）	0.96
泥土	0.92 to 0.96	漆器	0.80-0.95
水	0.92 to 0.96	漆器（无光泽）	0.97
冰	0.96 to 0.98	橡胶（黑色）	0.94
雪	0.93	塑料	0.85-0.95
玻璃	0.90 to 0.95	木材	0.90
陶瓷	0.90 to 0.94	纸	0.70-0.94
大理石	0.94	氧化铝粉	0.81
石膏	0.80 to 0.90	二氧化硅	0.78
冰层	0.85 to 0.91	铁氧化物	0.78 to 0.82
糖	0.93 to 0.96	不锈钢及铝漆	0.2-0.3



TIR 100-2红外热发射率测定仪

- 应用
 - ✓ **陆军**：应用于夜间侦查、瞄准、火炮及导弹火控系统、靶场跟踪测量系统；
 - **步兵手持式热像仪**作用距离为2~3km；



夜间侦查



美国RNO PC160 手持式红外热像仪



法国萨基姆防务公司为“铠甲S1”研制的热成像/光电火控系统

✓ **空军**：夜间导航、空中侦察及机载火控系统；

□ **星载热像仪**可用于侦查地面和海上目标，也可用于对战略导弹的预警。



美国首颗红外侦察卫星服役目的拦截中国导弹



上面的是中国的 下面的是SU30的

✓ **海军**：夜间导航、舰载火控即防空报警系统

□ **舰载光电火控系统**中的**热像仪**对海上目标跟踪距离为10km；地-空监视目标距离为20km。



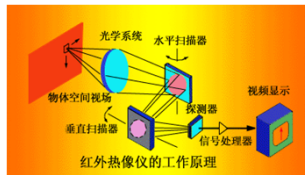
5.2 红外成像系统的工作原理和结构

• 红外成像系统的工作原理

✓ **方式一：扫描型**

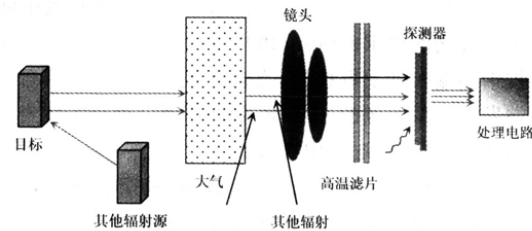
□ **光学系统**收集红外辐射→**光学滤波**→景物的辐射能量分布会聚到位于光学系统焦平面的**探测器光敏面**上。

□ **光机扫描器**构成的景物图像依次扫过**探测器**，探测器依次把景物各部分的**红外辐射**转换成**电信号**，经过视频处理的信号，在同步扫描的**显示器**上显示出景物的红外图像。



✓ **方式二：非扫描型**

□ 热像仪的红外光学系统把来自目标景物的**红外辐射聚焦于红外探测器上**，探测器与相应单元共同作用，把**二维分布的红外辐射**转换为按时间排列的一维视频信号，经过后续处理，变成可见光图像显示出来。

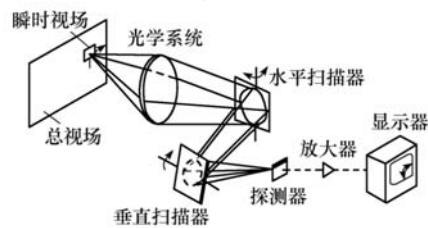


红外热像仪简单工作示意图

• 红外成像系统的类型和组成

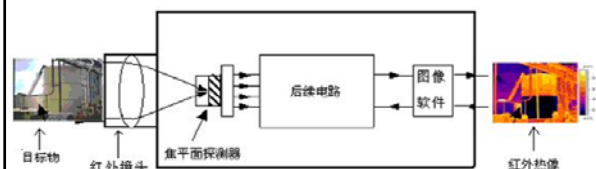
✓ **两大类**：光机扫描型和非扫描型

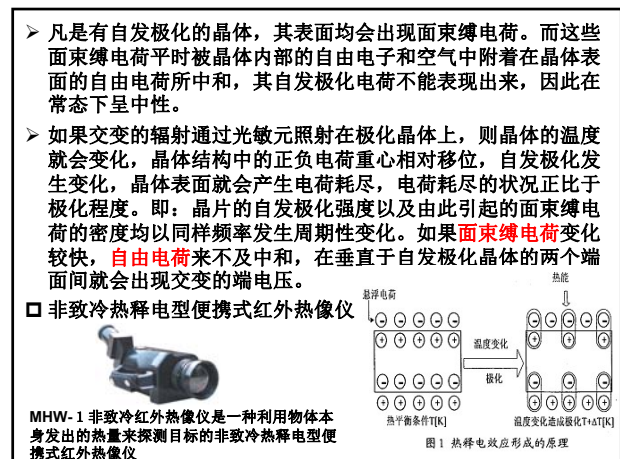
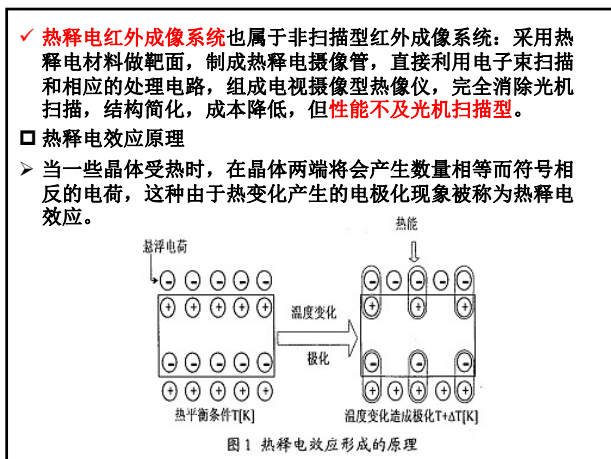
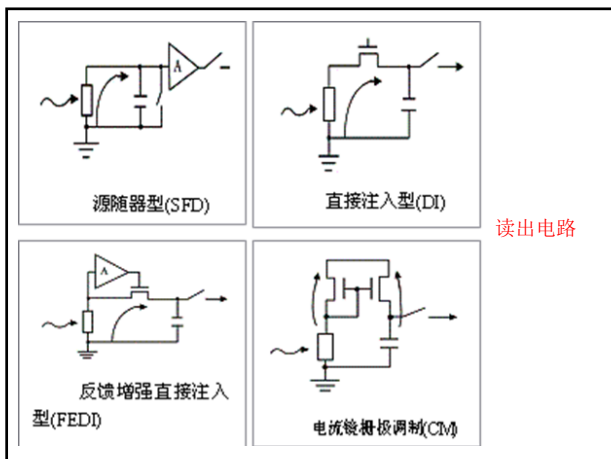
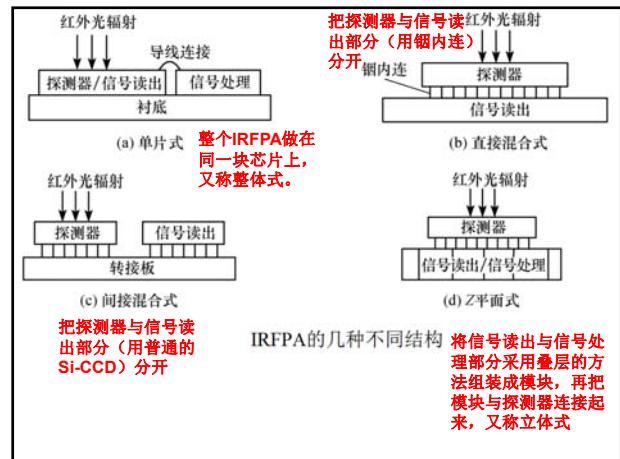
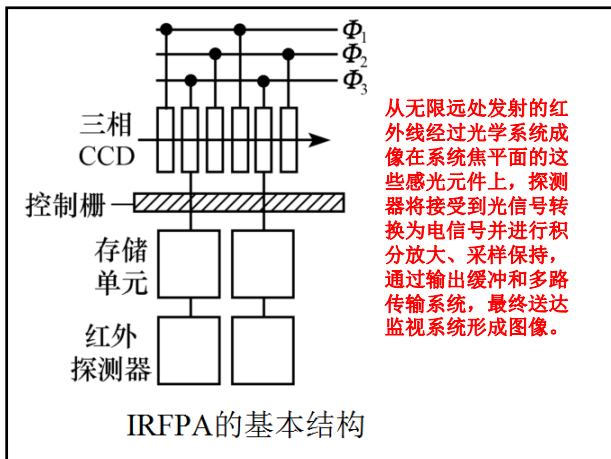
✓ 下图所示的红外成像系统就是光机扫描型的，借助光机扫描器使单元探测器依次扫过景物的各部分，形成景物的二维图像。可通过**隔直流电路**把背景辐射从目标信号中消除，从而获得对比度良好的红外图像。



光机扫描型热成像系统结构示意图

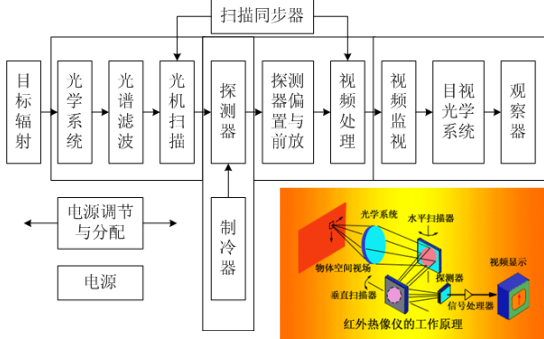
✓ 非扫描型红外成像系统利用**多元探测器阵列**，使探测器中的每一个单元与景物的微面元对应，因此可不需要扫描的光机。利用红外焦平面阵列器件（IRFPA），把二维被测目标的**红外辐射图像**转换为**电荷图像**，再借助CCD自扫描技术，输出一维时序电信号，最后经电路处理，输出景物热图。凝视型红外探测就属于这种类型。



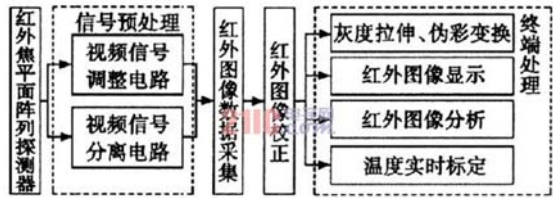


✓ 红外成像系统框图和工作过程

□ 如下图所示，红外成像系统包括四个组成部分：光学系统，红外探测器及制冷器，电子信号处理系统和显示系统。



□ 非扫描型红外热成像系统



红外热成像系统框图

• 扫描型红外成像系统基本参数

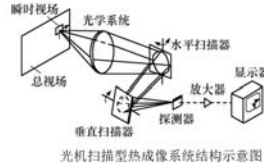
✓ 光学系统入瞳口径 D_0 和焦距 f'

□ 热像仪光学系统 D_0 和 f' 是决定其性能、体积和重量的重要因素。

✓ 瞬时视场

□ 光轴不动时，系统所能观察到的空间范围即为瞬时视场。它取决于单元探测器的尺寸及红外物镜的焦距，决定系统的最高空间分辨率。

□ 若探测器为矩形，尺寸为 $a \times b$ ，则： $\alpha = a / f'$ $\beta = b / f'$
即为瞬时视场平面角（常以rad或mrad表示）



光机扫描型热成像系统结构示意图

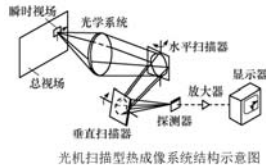
✓ 总视场

□ 总视场是指热像仪的**最大观察范围**。通常以水平方向、垂直方向两个平面角 A 和 B 来描述

✓ 帧周期 T_f 与帧频 f_p

□ 构成一副完整画面所花的时间 T_f 叫帧周期或帧时(以秒计)；而一秒内所构成的画面帧数或帧频或帧速 f_p （以频率计），故

$$f_p = 1 / T_f$$

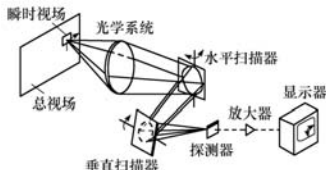


光机扫描型热成像系统结构示意图

✓ 扫描效率

□ 热像仪对景物成像时，由于同步扫描、回扫、直流恢复等都需要时间，而这些时段内不产生视频信号，故将其归总为空载时间 T_f' 。于是差值 $(T_f - T_f')$ 即为有效扫描时间，它与帧周期之比就是扫描效率 η ，即

$$\eta = (T_f - T_f') / T_f$$



光机扫描型热成像系统结构示意图

✓ 驻留时间

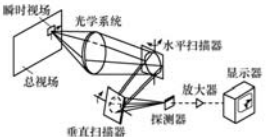
□ 系统扫描**扫过一个探测器**所经历的时间叫**驻留时间**，记为 τ_d ，是光机扫描热像仪的重要参数。

□ 若帧周期为 T_f ，扫描效率为 η ，热像仪采用单元探测器，则探测器驻留时间 τ_{d1} 即为：

$$\tau_{d1} = \eta T_f \alpha \beta / AB$$

□ 当探测器是由 n 个与行扫描方向正交的单元探测器组成的行列时，则驻留时间 τ_d 即为： $\tau_d = n \tau_{d1} = n \eta T_f \alpha \beta / AB$

□ 可见，在帧周期和扫描效率相同的条件下，把 n 个同样的单元探测器沿着与行扫描正交的方向排成行列，则在单个探测器上的驻留时间便延长 n 倍，这对提高热像仪的信噪比是有利的。必须注意，探测器的驻留时间应大于其时间常数。



光机扫描型热成像系统结构示意图

5.3 红外光学系统

• 光学系统主要由**红外物镜系统**和**光机扫描系统**组成。

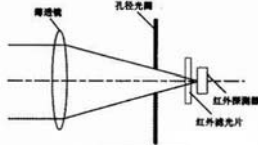
• 红外物镜系统

✓ **透射式**红外光学系统

□ 也称为**折射式**红外光学系统，一般由几个透镜组成。

□ 透射式红外光学系统的主要优点是：**无挡光**，加工球面透镜比较容易，通过光学设计易消除各种像差。

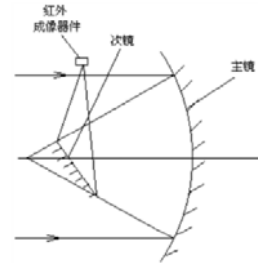
□ 但这种光学系统**光量损失较大**，装配、调整比较困难。



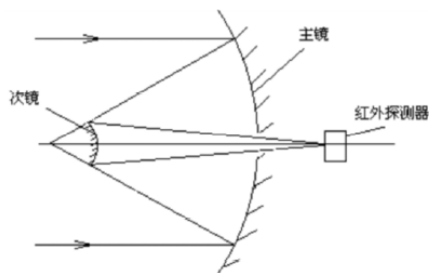
✓ **反射式**红外光学系统

□ 由于红外辐射的波长较长，能透过它的材料很少，因而大都采用**反射式**红外光学系统。按反射镜截面的形状不同，反射系统有**球面形**、**抛物面型**或**椭球面形**等几种：

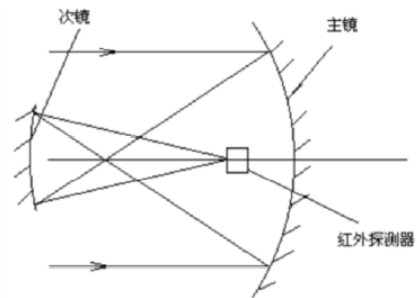
□ **牛顿系统**：主镜是抛物面，次镜是平面，如图所示。这种系统结构简单，易于加工，但**挡光大**，结构尺寸也较大。



□ **卡塞格林系统**的主镜是抛物面，次镜是双曲面，如图所示。这种系统**较牛顿系统挡光小**，结构尺寸也较小，但**加工比较困难**。



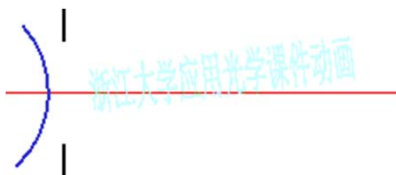
□ **格里高利系统**的主镜是抛物面，次镜是椭球面，如图所示。其加工难度介于牛顿系统和卡塞格林系统之间。



□ 在实际应用中，应用最广的是**球面镜**和**抛物镜**。反射镜的性能很大程度上取决于反射表面的状态和反射层局部的破损、玷污和潮湿，因此要仔细保护好反射镜表面的清洁和完整性。

□ 反射式光学系统的优点是：对材料要求不太高，重量轻，成本低，光量损失小，不存在色差等。

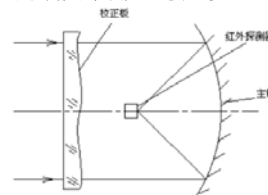
□ 其缺点是：**有中心挡光**，有较大的**轴外像差**，难于满足大视场大孔径成像的要求。



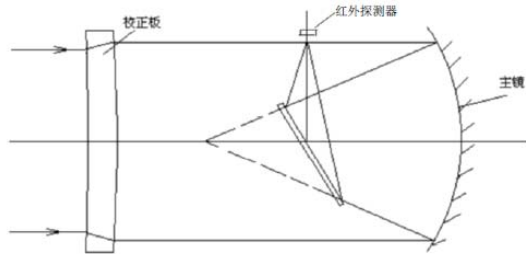
✓ **折反射组合**光学系统

□ 由反射镜和透镜组合成的**折反射式**光学系统可以结合反射式和透射式系统的特点，**采用球面镜取代非球面镜**，同时用补偿透镜来**修正球面反射镜的像差**，从而获得**较好的像质**。但这种系统往往**体积大**、**加工困难**，**成本也比较高**，典型的折反射系统：

➢ **施密特系统**的主镜是球面反射镜，其前面安装有一个校正板，如图所示，可根据校正板厚度的变化来修正球面镜的像差，但这种系统的结构尺寸较大，校正板加工困难。

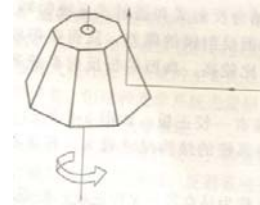


- 马克苏托夫系统的主镜为球面镜，采用**负透镜**（称为马克苏托夫校正板）校正球面镜像差。如图所示。若用光阑和马克苏托夫校正板设在主镜的球心附近，则可以进一步减小物镜的轴外像差。



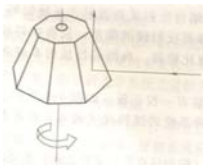
• 光机扫描系统

- ✓ 常用的光机扫描部件有**摆动平面镜**、**旋转反射镜鼓**、**旋转折射棱镜**、**旋转折射光楔**等。它们单独或组合成常用几种扫描机构。
- ✓ 旋转反射镜鼓作二维扫描能兼作行扫描、帧扫描的反射镜鼓，如图所示。它是一个多面体，其每一侧面与旋转轴构成不同的倾角 θ_i 。如第1面倾角 $\theta_1=0$ ，第2面 $\theta_2=\alpha$ ；第3面 $\theta_3=2\alpha$ ；第*i*面倾角 $\theta_i=(i-1)\alpha$ 。



产生带扫描的多面镜鼓

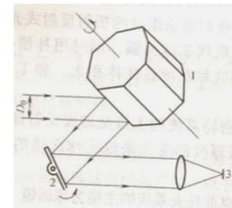
- 这样，当第一面扫完转到第二面是，光轴在列的方向上也偏转了 α 角若使 α 角正好对应于探测器面阵（或并扫线阵）在列方向的张角，则这个单一的旋转反射镜鼓就可兼有二维扫描的功能。这种**方案结构紧凑，帧扫描效率**很高，适于中低档水平的热像仪和手持式热像仪采用。
- 由于反射镜鼓的反射面系统镜鼓的中心轴线旋转，致使反射面的位置又相对于光线的位移，这种位移若出现在汇聚光路中，则会产生“**散焦**”现象，影响像质，故反射镜鼓多用在**平行光路**中。



产生带扫描的多面镜鼓

✓ 平行光路中旋转反射镜鼓与摆镜组合

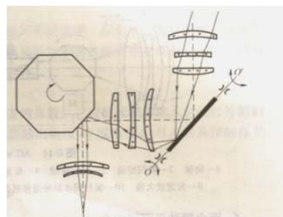
- 图所示的机构是**右旋转反射镜作行扫描、摆镜作帧扫描**的例子。镜鼓、摆镜均在平行光路中，其外形尺寸必须保证有效光束宽度 D_0 和所要求的视场角 2ω ，故比较庞大，加之摆镜运动的周期性往复以及在高速摆动情况下使视场边缘不稳定，不易高速扫描。这种二维扫描机构无附加像差，实施容易。



旋转镜鼓作行扫描，摆镜做帧扫描
1反射镜鼓 2摆镜 3探测器

✓ 平行光路中反射镜鼓加会聚光路中摆镜

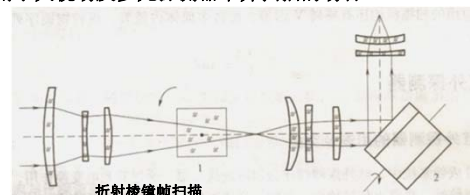
- 图所示的机构是由会聚光路中的**摆镜**绕平面内的轴线 OO' 摆动完成**帧扫描**，由准直镜组之间（平行光路）的**反射镜鼓**绕与图面垂直的轴线旋转完成**行扫描**。
- 这种机构扫描效率与上述“2”相同，但由于摆镜在会聚光路中，摆动时产生“**散焦**”而影响像质，不宜作大视场扫描用。



会聚光束摆镜

✓ 折射棱镜与反射镜组合

- 图所示系统中，四方**折射棱镜**，在前置望远镜的**会聚光路**里旋转执行**帧扫描**，而**反射镜鼓**2位于物镜前的平行光路里旋转作**行扫描**。前者转轴与图面垂直，后者转轴在图面内。由于折射棱镜扫描效率比摆镜高，故这种组合的总扫描效率比摆镜扫描方案高。加之反射镜鼓处在经望远镜压缩的平行光路中，故尺寸可以相对减小。但折射棱镜在会聚光路中产生像差，且折射棱镜要旋转，系统像差设计较难。如果设计恰当，可用于大视场及多元探测器串并扫描的场合。



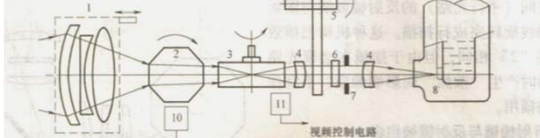
折射棱镜帧扫描
1 旋转折射棱镜 2 旋转反射镜鼓

✓ 会聚光路中两旋转折射棱镜组合

- 图所示的结构是由会聚光路中两旋转的折射棱镜组合完成二维扫描，其中帧扫描在前，转轴与图面垂直；行扫描棱镜在后，转轴在图面内且与光轴正交。两者棱面数量相当。由于行扫描棱镜入射面靠近物镜焦平面，这里光束宽度变窄，故其厚度尺寸可以小些，使之易于实现高速旋转，达到高速扫描。
- 这种系统最大优点是扫描速度快，扫描效率高（帧频可达20Hz，若用多元探测器，帧频可达50Hz）；缺点是像差设计困难。它成为高速热像仪采用的扫描方案。

AGA680型热像仪原理图

1物镜 2帧扫描棱镜 3行扫描棱镜 4聚光棱镜 5调制器 6滤光片 7光阑 8探测器 9前置放大器 10帧扫描同步脉冲传感器 11行扫描同步脉冲传感器 12阴极射线管



✓ 两个摆动平面镜组合

- 用两个摆轴互相垂直的平面镜可构成二维扫描机构，其中一个完成行扫描，另一个完成帧扫描。由于摆动平面镜可安置在平行光路或会聚光路中，给系统方案设计留有较多的选择余地。但由于摆镜稳定性差，不宜作高速扫描。
- ✓ 实际应用的扫描机构还有V形镜、旋转多面体内镜鼓、旋转物镜序列，摆动探测器阵列等。

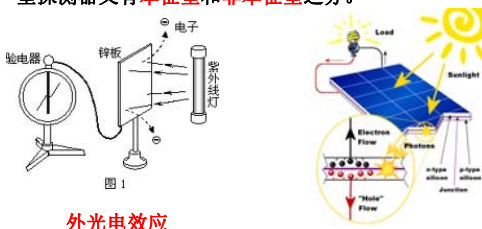
5.4 红外探测器

- 5.4.1 红外探测器的用途和类型
- 5.4.2 红外探测器的特性参数
- 5.4.3 常用红外探测器

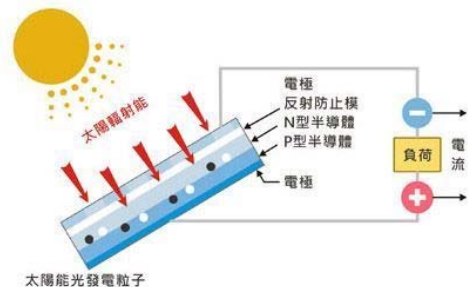
5.4.1 红外探测器的用途和类型

- 在红外成像系统中，红外探测器作为辐射能接收器，通过其光电变换作用，将接收的辐射能变为电信号，再将电信号放大、处理、形成图像。**红外探测器是构成红外成像系统的核心器件。**
- 红外探测器有**热探测器**和**光子探测器**两大类。
- ✓ 红外热探测器，如热敏电阻、热耦、热释电探测器等。这类探测器吸收红外辐射后，**使敏感元件温度上升**，引起与温度有关的物理参数改变。
- ✓ 光子探测器是通过**光子与物质内部电子相互作用**，产生电子能态变化而完成光电转换的探测器。

- 在热成像系统中，主要利用光子探测器，因为无论在响应的灵敏度方面或是响应的速度方面，都优于热探测器。光子探测器又分为**光导型**和**光伏型**两类。
- ✓ 光导型探测器是利用半导体的**光电效应**而工作的。所谓光电效应就是半导体吸收光子能量后，产生非平衡载流子（自由电子或空穴）。这些载流子参与导电，使半导体的电导率增加。由于本征和非本征半导体都能产生光电效应，所以光导型探测器又有**本征型**和**非本征型**之分。



- ✓ 光伏型探测器是利用半导体的**光伏效应**而工作的，即在本征半导体上形成PN结，在入射光子作用下产生电子-空穴对，内建电场使两类载流子分开而产生电动势。



5.4.2 红外探测器的特性参数

- 表征红外探测器性能的基本参数有响应度、噪声等效功率、探测率、比探测率、时间常数及光谱响应、背景限制的比探测率等。
- 响应度
 - ✓ 探测器的**响应度**是表征探测器对辐射敏感程度的参数。它表征探测器将入射的红外辐射转变为电信号的能力。响应度 R 的定义是，探测器输出电压 U_s 或电流 I_s 与入射到探测器光敏面积上的辐照度 ϕ 之比，即

$$\begin{cases} R = U_s / \phi \\ R = I_s / \phi \end{cases}$$

• 噪声等效功率

- ✓ 在实际应用中，红外探测不仅接收到入射的辐射信号，而且在探测器中总会有噪声存在。很明显，噪声的存在限制了探测器对微弱辐射信号的探测能力，即探测器能探测到的最小辐射功率受到限制，**噪声等效功率**的定义是，**探测器输出信号功率与噪声功率相等时，入射到探测器上的辐射功率**。表示为：

$$NEP = EA_d U_N / U_s$$

- ✓ 式中， E 为入射到探测器上的辐照度； A_d 为探测器光敏面积； U_s 为探测器输出信号电压的方均根值； U_N 为输出的噪声电压的方均根值。这一参数表征了探测器所能探测的最小辐射功率的能力，该值越小，表示探测器的性能越好。

• 探测率与比探测率

- ✓ 噪声等效功率的倒数称为**探测率**，即：

$$D = 1 / NEP$$
- ✓ 显然， D 越大探测性能越好。这一参数描述的是，探测器在它的噪声电平之上产生一个可测量的电信号的能力，即探测器**能响应的入射功率越小**，则探测率越高。
- ✓ 为了更方便地对不同的探测器进行比较，需要把探测率 D 归一化到测量电路带宽1Hz，探测器光敏面积为1cm²。这样就能方便地比较不同**测量带宽**，不同**光敏面积**的探测器的探测率值。
- ✓ 实际测量和理论分析表明，对许多类型的探测器来说，其**噪声电压 U_N 与光敏面积 A_d 的平方根成正比，与测量带宽 Δf 的平方根成正比**。

- ✓ 因此除 U_N 以 $\sqrt{A_d \Delta f}$ ，则 D 就与 A_d 与 Δf 无关了，也就实现了归一化。这种归一化的探测率又称**比探测率**。通常用 D^* 表示，表达式：

$$D^* = D \sqrt{A_d \Delta f}$$

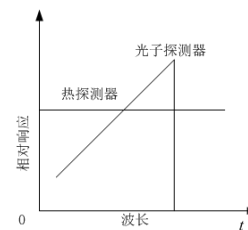
- ✓ 这一参数与测试条件有关，在给出 D^* 时应说明测试条件， $D^*(500,800,1)$ 该值表示对500K黑体探测，调制频率为800Hz，放大器带宽1Hz时的比探测率。

• 时间常数

- ✓ 当一定功率的辐射入射到探测器的敏感面上时，探测器的输出电压要经过一定的时间才能上升到与这一辐射功率相对应的定值。当辐射突然消除时，输出电压也要经过一定的时间才能下降到辐射照射前的值，以一个矩形的辐射脉冲照射到探测器上，观察其输出信号波形，会发现输出信号上升或下降都落在矩形脉冲之后。大多数情况，信号按 $1 - e^{-t/\tau}$ 的规律上升或下降，其中 τ 定义为探测器的**时间常数**或响应时间。
- ✓ 换句话说，探测器的时间常数就是输出信号电压从零上升到**最大值的63%**所需的时间。现代光子探测器的时间常数很短，可达微秒甚至纳秒数量级。
- ✓ 在热成像系统中，探测器的**时间常数**要小于探测器扫描的**驻留时间**。

• 光谱响应

- ✓ 相同功率的各单色辐射入射到探测器上，**所产生的信号电压与辐射波长的关系**，称为探测器的光谱响应，通常用单色辐射的响应度 R_λ 或光谱比探测率 D_λ^* 对波长作图来描述探测器的光谱响应。图是光子探测器和热探测器的理想光谱响应曲线。



探测器的理想光谱响应形状

✓ 由上图可见，两类探测器的光谱响应曲线是很不一样的。对于光子探测器，只有入射光子能量大于 hf_c 时，才能产生光电效应使探测器有输出。也就是说，仅仅对波长小于 λ_c 的光子才有响应。在波长小于 λ_c 的范围内，光子探测器的响应度随波长增加，到截止波长 λ_c 处突然下降为零。这样，光子探测器的光谱比探率 D_λ^* 可写为：

$$D_\lambda^* = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_c} D_{\lambda_c}^* & \lambda \leq \lambda_c \\ 0 & \lambda > \lambda_c \end{cases}$$

λ 又称峰值波长，通常用 λ_p 表示。

✓ 对于热探测器，其响应度只与吸收辐射功率有关，而与波长无关。可以认为 $D_\lambda^* = D_\lambda$
✓ 上述指的是理想曲线，实际曲线可能有偏离。例如，光子探测器的实际响应并不在 λ_c 处突然截止，而在 λ_c 附近逐渐下降。一般规定响应度下降到峰值的50%处的波长为截止波长。

• 背景限制的比探率

- ✓ 理想光子探测器将吸收波长小于截止波长的全部入射光子，因为这些理想探测器本身不产生噪声，其性能受背景辐射光子数起伏产生的噪声——光子噪声所限制。当探测器性能受到背景光子的噪声限制时，这种探测器称为背景限制的，即Blip探测器。
- ✓ 在一定的波长上，背景限制的光导型探测器 D^* 的理论最大值为：
$$D_\lambda^* = \frac{\lambda}{2hc} \left(\frac{\eta}{Q_b} \right)^{1/2}$$
- ✓ 式中， h 为普朗克常数； c 为波长； Q_b 为入射到探测器上的半球背景光子辐射出射度。
- ✓ 将 h 和 c 值代入上式得：
$$D_\lambda^* = 2.52 \times 10^{18} \lambda \left(\frac{\eta}{Q_b} \right)^{1/2}$$
- ✓ 对于光伏型探测器，由于没有复合噪声，上式应乘以 $\sqrt{2}$ 。已有不少光子探测器接近背景限。

5.4.3常用红外探测器

- 对于红外探测器的基本要求：
 - ✓ 尽可能高的探测率，以提高系统的热灵敏度；
 - ✓ 工作波段应与被测目标的辐射光谱相适应，以便接收尽可能多的红外辐射；
 - ✓ 用于并扫的多元探测器，各单元探测器的特性要均匀；
 - ✓ 探测器的响应速度快，即时间常数小，以适应快速扫描的要求；
 - ✓ 为使热成像系统小型轻便，探测器制冷要求不宜太高，最好能有非制冷的探测器。

一些红外探测器的性能

探测器	模式	响应波段 $\Delta\lambda / \mu\text{m}$	峰值比探率 $\text{cm}^2\text{W}^{-1}\text{s}^{-1}$	响应时间 τ/s	阻值 r/Ω	工作温度 T/K
LATGS 硫酸三甘肽	热释电	1~38	$3\sim 10 \times 10^8$	$<10^{-3}$	$\geq 10^{11}$	300
LiTaO ₃ 钽酸锂	热释电	2~25	$4\sim 5^8$	$<10^{-3}$	$\geq 10^{12}$	300
PbS 硫化铅	光导	1~3	$5\sim 7 \times 10^{10}$	$1\sim 10 \times 10^{-4}$	100~500k	300
InAs 砷化镓	光伏	1~3.8	$1\sim 2 \times 10^9$	$<10^{-6}$	2~50	300
InSb 碲化铟	光导(浸没)	2~7	2×10^9	$<10^{-7}$	50~100	300
HgCdTe 碲镉汞	光伏	7~14	$0.1\sim 1 \times 10^{10}$	$<5 \times 10^{-9}$	30~100	77
HgCdTe	光导	8~14	$0.5\sim 1 \times 10^8$	$<10^{-6}$	50~100	193
PbSnTe 碲锡铅	光伏	8~14	$0.1\sim 1 \times 10^{14}$	$<10^{-8}$	20~50	77
Ge:Hg	光导	6~14	$2\sim 4 \times 10^{10}$	$<10^{-7}$	100~1000k	38

