第 5 章 光电探测、成像、显示及电子系统设计

CHAPTER 5

光电探测、成像与显示系统既是复杂、大型光电系统的重要组成部分，也可各自构成独立的光电系统：光电探测系统、光电成像系统、光电显示系统。这 3 类光电系统从不同角度，细分类别较多，在许多领域现实应用广泛。电子系统不仅是这 3 类系统，也是各种光电系统的重要、甚至是核心组成部分，其性能和设计固然也是光电系统性能和设计不可或缺的关键。这里选取紫外、可见光、红外、太赫兹等几类典型光电探测与成像、显示，以及电子系统设计予以介绍。

本章首先简述紫外探测系统的系统组成与工作原理、总体技术方法、主要性能要求等，介绍 CCD 与 CMOS 传感器及其技术比较，以及在微光电视和紫外成像系统中的应用。其次详细分析红外凝视成像系统的系统组成和工作原理、性能评价常用指标、非均匀性产生的原因及其校正技术、微扫描技术、非制冷红外焦平面探测器等，特别示例短波红外成像系统及设计考虑。然后阐述太赫兹(Terahertz，THz)成像系统的组成、工作原理、技术特点及关键技术，对多种成像系统技术进行比较。接着通过示例介绍红外传感器工程设计，并简要介绍光电显示系统，研讨计算成像系统。最后，概略性归纳与评述电子系统设计。

5.1 紫外探测系统

紫外探测系统利用大气背景和目标(导弹和飞机等)紫外辐射可形成良好的对比度，并凭借其具有被动探测性、实时性、隐蔽性好等优势，在很多领域得到了广泛应用。在分析紫外探测系统的特点，并阐述其工作原理及组成的基础上，以近地层高空目标探测为例，对紫外探测系统总体技术进行分析，提出紫外探测系统主要技术性能要求。

5.1.1 紫外探测系统的特点

与可见光、红外探测系统相比，紫外探测系统具有以下特点：

(1) 宇宙天体中的许多元素在紫外波段有很强的吸收和发射作用，通过紫外探测系统对天体进行探测，能促进和加深对天体物理性质的认识。

(2) 紫外探测系统可以在良好的背景下工作，虚警率低，能更准确有效地对特定目标进行监视、跟踪和识别。

(3) 紫外探测系统采用相对成熟的高灵敏度传感器和信号处理技术。

(4) 紫外探测系统工作波长较短，光学衍射效应小，加上探测器对热特性不敏感，无须

低温冷却和扫描，使得系统重量轻，体积小，结构大大简化，同时也降低了成本。

由于紫外辐射的非热性，紫外波段大气辐射传输特性和可见光、红外辐射传输特性既有相似之处，又有自己的独特之处。在太阳辐射穿过地球大气层的过程中，高层大气中的氧气会强烈吸收波长小于 200nm 的紫外辐射，该波段的紫外辐射只能在太空中传输，因而这一波段的紫外被称为“真空紫外”。对流层上部平流层（同温层）中的臭氧强烈吸收 200～300nm 波长范围内的紫外辐射，该光谱区的太阳辐射基本上到达不了地球近地表面，光学背景微乎其微；通常将 200～300nm 这段太阳辐射无法到达近地表面的中紫外光谱区称作“日盲”区（也有指 200～280nm），太阳中的这一波段紫外辐射在近地大气中几乎不存在。也就是说，地面不存在太阳光的“日盲”紫外干扰，同时也不会有“日盲”紫外由地面传输到地球大气层外。在大气层外观测地球背景时，“日盲”区内只有很少的紫外辐射会散射到大气层外，该区域的背景辐射非常微弱并且比较均匀。300～400nm 近紫外区的太阳辐射通过大气层到达地表的成分较多，该区域被称为大气的“紫外窗口”。当星载探测仪器工作时，若响应光谱波段位于“日盲”区内，则观测目标会在均匀微弱的背景上形成“亮点”；若响应光谱波段位于“紫外窗口”内，则观测目标会挡住大气散射的太阳紫外辐射，从而在均匀的背景上形成“暗点”。因此，在大气层外，“日盲”区和近紫外区可用于紫外探测；在近地层，“日盲”区可用于非对准紫外光通信和相对近距离紫外成像，近紫外区波段可主要用于紫外成像。

5.1.2 紫外探测系统组成及工作原理

要对紫外探测系统进行设计，应充分了解其组成和工作原理。

1. 系统组成

紫外探测系统的组成如图 5.1 所示。

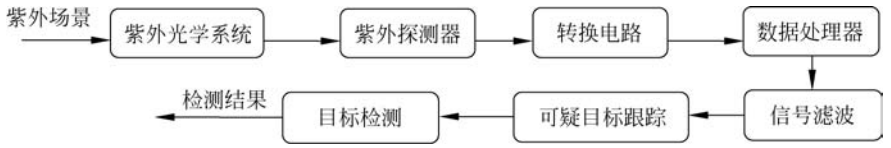


图 5.1 紫外探测系统的组成

（1）紫外光学系统：以大相对孔径对目标（如空间高速运动导弹和飞机等）的紫外辐射进行高分辨率接收。

（2）紫外探测器：对紫外辐射信号源进行图像采集。通常的紫外探测器有光电真空探测器（光电倍增管、像增强器等）、光电导探测器（GaN 基和 AlGaN 基光电导探测器等）和光伏探测器（Si、SiC、GaN P-N 结、CCD 和肖特基势垒光伏探测器等）。

（3）转换电路：以紫外光学系统采集到的目标紫外辐射信号在紫外探测器响应，使探测器输出的模拟信号通过模数转换，转换成数字信号，方便后续电路的数字化处理。

（4）数据处理器：进行数字信号的处理。

（5）信号滤波：目的是使系统的随机噪声最大化的滤除，提取出有用信号，从而提高信噪比。

（6）可疑目标跟踪：根据一定准则（如灰度、运动状态等），标记、跟踪潜在目标。

(7) 目标检测：对紫外数字信号进行多帧间的判断处理，提高探测系统识别目标的概率。

2. 系统工作原理

由于臭氧对太阳辐射光谱中的中紫外辐射在 20～30km 高度层中吸收作用明显，而使低空产生“日盲”效应。与之相反，目标紫外辐射相对较多(如飞机或导弹等高空高速目标飞行时因燃料猛烈燃烧使其温度很高而产生的紫外辐射较多)，这样在紫外场景中形成的对比度较高。目前紫外探测系统主要利用中紫外工作波段来探测导弹、飞机等目标辐射信号。

通过大相对孔径紫外光学系统高分辨率采集其视场范围内的目标紫外辐射信号，其辐射信号通过光电转换单元，由模拟光信号转换为模拟电信号，再对其模拟电信号进行有效处理，从而最大限度地滤除噪声，提高系统信噪比。然后通过数据处理器对信号进行数字化，从而实现信号中存在可疑目标的初级处理。再通过对信号的帧间处理，做出对在视场范围内有无目标的判定。如果有，则通过进一步的计算分析，从而得出目标的空间位置等信息。

5.1.3　总体技术方法分析

目标紫外探测总体技术研究的内容包括紫外探测系统的工作波段、目标紫外辐射特性、紫外大气传输、紫外光学系统、高性能紫外探测器、高质量滤光片、弱目标信号处理和作用距离模型的建立等。

为了使紫外探测系统获得较高的信噪比，选择系统工作波段时，需考虑目标及其背景辐射对比度特性、紫外大气传输特性、紫外光学材料响应和紫外探测器响应等方面的因素，进行综合考虑。

根据温度、大气成分和电离状态在垂直方向的分布特征，平流层大气密度较小，而且很稳定，对紫外大气传输影响不大，中间层、热成层和散逸层对紫外大气传输影响可忽略。因此，对紫外光传输特性影响最大的是对流层，需要深入研究。值得一提的是，地球大气背景紫外光谱辐射亮度及其场景分布是高空(星载)紫外探测系统对地监视、对空中目标探测识别等应用必需的基本数据，为空对地(地对空)紫外探测系统设计提供相关的理论基础。

紫外光学系统设计的目的是通过紫外光学系统使空间视场内的紫外辐射会聚在整个紫外探测器上。紫外光学系统往往需要具有工作波段宽、系统体积小和结构简单等特点，对其成像质量、环境适应性等进行评价。在紫外波段，反射式光学系统具有独特优势，因为反射镜没有色差，而折射材料在波长越短时，则色散越大。

紫外弱目标信号处理是关键技术之一。对弱信号进行如相关处理、信号平均、锁定放大、低噪声前置放大、自适应噪声抵消等有效的信号处理方法，最大限度地滤除探测系统的噪声，提高系统信噪比。紫外弱目标信号处理可采用自适应滤波方法。

紫外探测系统作用距离模型有多种，包括考虑弥散斑对成像质量影响，且基于信噪比的作用距离模型，以及基于探测概率和虚警率的作用距离模型。通过紫外目标辐射数据、探测器相关参数、大气传输数据，从不同的角度分别建立作用距离模型。以建立的紫外作用距离模型为基础，进一步对其产生影响的主要因素进行研究，从而得到具有工程应用参考价值的总体技术方法。

1. 目标紫外辐射特性

不同目标的紫外辐射特性是不同的。对高空高速运动目标，如导弹或飞机等目标，一般

为在 10km 以下的高空，运动速度在亚音速以上。

1）高空高速目标的紫外辐射

战术型导弹常常采用固体推进剂，而其产生紫外辐射的主要来源为以下几个方面：

（1）热发射。一类为黑体辐射。由于推进剂在燃烧室内燃烧剧烈，其温度可达 3000K 以上。根据普朗克黑体辐射理论，大部分辐射光谱分布在 1～3μm 的红外波段，只有少量分布在紫外波段。另一类是热粒子辐射。为了提高燃烧效率，固体推进剂中一般加入了固体铝，在其固化的过程中，因其产生的大量氧化铝粒子，其温度足够高且不变，向外产生紫外辐射，其过程在紫外发射过程中起关键作用。因此，导弹尾焰中的紫外辐射，其辐射效果可看成 2300K 的黑体辐射乘以氧化铝粒子的辐射效率曲线。

（2）化学荧光辐射。大部分导弹尾气流中含有很多没有燃尽的燃料。由于燃烧生成高浓度的碳、氮和氢，这些残余燃料发生化学反应就产生了紫外辐射。

（3）其他辐射。在几乎全部的碳氢焰的燃料同氧化剂发生氧化的过程中，OH 基团都可发出强烈的紫外辐射。当发生剧烈反应燃烧时，激发态的 OH 基团衰变到基态时，从中产生紫外光子，成为产生紫外辐射的来源之一。

另外，NO 化学荧光发射也以相似的方式对紫外辐射做出一定的贡献。NO 的 Gamma 辐射在所有以氮作基本燃料的火箭羽烟中都可以观察到这一现象。OH 基团等的发射带如表 5.1 所示。

表 5.1　OH 基团等的发射带

分　　子	紫外波段/nm
OH	244～308
CO_2	287～316
CO	200～246
NO	250～370
O_2	244～437

2）大气背景的紫外辐射

大气背景紫外辐射因季节、地理位置、天顶角、地面反射率不同，大气背景的不同而不同，其变化规律是紫外探测的重要理论基础之一。大气背景紫外辐射的变化影响着紫外探测器的动态变化范围。

特定条件下大气背景紫外辐射光谱辐射亮度曲线，如图 5.2 所示。有云条件下的大气背景紫外辐射亮度明显高于无云条件下的大气背景紫外辐射亮度。在不同气象条件下，介于 290～320nm 波段内的紫外辐射亮度大约有 3 个数量级变化。小于 300nm 的太阳辐射电磁波，因在 20～30km 高度层的臭氧比较强烈吸收作用，所以在近地面受大气条件的影响不大。

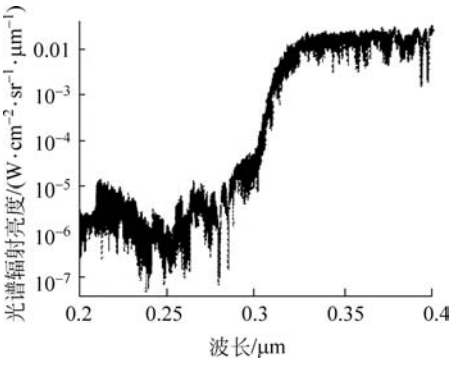


图 5.2　大气辐射光谱亮度曲线

紫外探测系统的主要背景辐射源来自天空中气辉辐射，其辐射波段为 100～390nm，但是它的辐射强度很低，通常只有几百个光子/(cm^2 · s)。气辉有日辉和夜辉两种情况。日辉是由于白天时大气组分吸收了太阳辐射，并再辐射产生的光谱辐射，它们来源于太阳辐射的共振和荧光散射、化学和离子反应及原子和分子的光电激发，白天的背景辐射主要来自 NO 在 200～300nm 的辐射；夜辉是由大气在白天吸收了太阳紫外辐射而在夜间产生的光谱辐射。由于存在各种缓慢的反应，氧气在白天形成的 O 和 O_3 能够存储一定的能量，这些能量在夜间释放出来就形成气辉。在中紫外波段，夜辉的主要特征就体现在氧

气的 Herzberg 带。

闪电过程中，气体温度在 20 000K 以上时所辐射的光谱包含紫外成分。在闪电放电过程中，所产生的紫外辐射如图 5.3 所示。

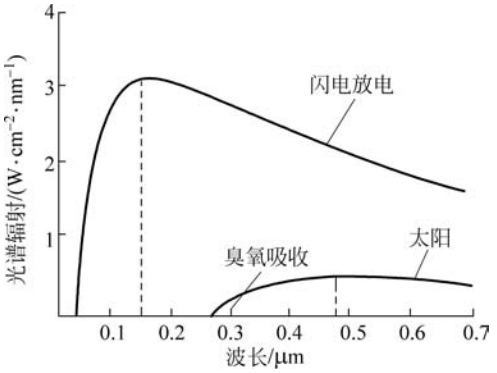


图 5.3　闪电放电、太阳辐射光谱与波长的关系

2. 高灵敏度紫外探测器

对“日盲”紫外探测而言，理想的紫外探测器具有探测面积大、增益高、量子效率高、光学效率良好和紫外/可见光抑制比高等特点。由于在中紫外区目标辐射信号较弱，除了在光路中使用必要的紫外光学元件和光路优化外，对紫外探测器性能指标要求也非常苛刻。在高空高速目标紫外探测系统中还要求紫外探测器具有较小的时间常数和较高的响应频率等。选择紫外探测器时，应综合考虑紫外探测器的增益、信噪比、制造器件工艺的可靠性、器件结构的复杂性和成本等因素。

第一代紫外探测系统以单阳极光电倍增管为核心，具有结构简单、性能可靠、体积小、重量轻、虚警率低、低功耗等优点。但缺点是角分辨率差、灵敏度较低、只能探测到紫外辐射的概略源等。之后发展的多阳极光电倍增管，具有处理二维信息能力，受到了重视。而在此基础上发展的多阳极微通道阵列器件可实现成像，且具有体积小、探测灵敏度高、增益高、暗电流小、响应速度快等优点，可用于探测高速运动的紫外目标。但缺点是仍离不开高压电源、功耗大，仍需要低效且昂贵的紫外滤光片。第二代增强型电荷耦合器件(Intensified CCD，ICCD)和电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)，其中，紫外探测器能精确接收紫外辐射，具有识别能力强、体积小、重量轻、探测灵敏度高的优点，在国内外紫外探测系统中得到了广泛的应用。

近年来发展的 GaN 紫外探测器、ZnO 紫外探测器、SiC 紫外探测器和金刚石紫外探测器等新型的宽禁带探测器件，具有体积小、耐恶劣环境、工作电路简单、量子效率高、紫外/可见光抑制比很高等优点。然而，虽制备高铝组分 AlGaN 材料得到了长足的发展，但也存在诸多问题。制备在“日盲”区具有高效率的薄膜是研制高性能 $Mg_xZn_{1-x}O$ 紫外探测器所必需的。SiC 探测器应用于“日盲”光电探测技术有待进一步成熟。而金刚石紫外探测器因成本较昂贵，且与电路兼容性偏弱，使其得到广泛应用还有难度。

3. 高性能“日盲”紫外滤光片

“日盲”紫外滤光片通带多数在中紫外区，具有良好的紫外/可见光抑制比，且透过率大多在 20%～50%。根据滤光片的工作原理可将其划分为 3 种类型：吸收型滤光片、干涉型

滤光片和声光型滤光片。吸收紫外滤光片具有高透过和深截止特性，透过率一定的紫外光信号，可调节吸收材料的浓度来改变背景光截止度。声光可调滤光片是一种电调谐滤光片，具有扫描速度快、调谐范围宽、入射孔径角大、无多级衍射、光谱分辨率高（可达到 0.1nm）、易于实现计算机控制等特点。在干涉型“日盲”滤光片方面的研究较成熟，但是由于其具有机械强度和化学稳定性差等局限性，因此很难满足较长距离探测的要求。吸收型紫外滤光片具有良好的“日盲”功能，且满足长距离探测要求。如何增强吸收型紫外滤光片恶劣环境的适应性和设计可靠的安全裕度，是滤光片的主要研制方向。另外在设计紫外光学系统时，可以采用“日盲”材料的光学主镜进行组合滤光来提高滤光性能，从而提高整个系统的探测性能。

滤光片的主要性能参数有峰值透射比、峰值波长、通带中心波长、波形系数、背景抑制和截止区域等。所以具体选择滤光片时主要是围绕其主要性能参数，如峰值透过率高、背景低、截止区宽、中心波长定位精度高及波形系数考虑的。

在选择滤光片时，还应综合考虑以下几个因素：

（1）紫外辐射光谱分布。

（2）紫外辐射源干扰源。

（3）探测器件光谱灵敏度。

（4）由于紫外滤光片光学透过率较低且昂贵，消减了由大相对口径光学系统增加的光学效率，同时大相对口径紫外光学系统会聚紫外辐射能量，导致处于后级的窄带紫外滤光片在较短时间内升温，以致损坏。

因此滤光片的选择应该在目标特性和制作工艺上进行折中。

4. 弱目标信号处理系统

弱信号接收和处理系统是紫外探测技术发展的关键技术之一。紫外信号处理包括紫外信号的数字化和数字化图像的时空域处理。紫外辐射信号以模拟方式入射到紫外探测器上，相应的模拟检测方式包括紫外信号采集、光电转换和放大、调制解调以及编码-解码方式，尤其是抗干扰和去噪声是关键。对于热噪声、散弹噪声等，必须对噪声信号进行如锁定放大、低噪声前置放大、自适应噪声抵消等有效的信号处理方式，最大化地滤除探测系统的噪声，提高系统的信噪比。由于紫外探测器的输出信号会随紫外目标距离的变化而变化，因此过程中的信号放大电路可考虑采用自适应增益控制电路。

5.1.4 主要技术性能要求

紫外探测系统的主要技术性能要求包括紫外探测系统的作用距离、视场、分辨率、探测概率和虚警率等。

紫外探测系统在一定的环境条件、探测概率和虚警率情况下，紫外探测系统能探测或者跟踪目标的最大距离叫作用距离。作用距离是衡量紫外探测系统综合性能优劣的重要指标，也是设计的核心指标。

系统视场可分为紫外光学垂直视场和水平视场。

按经典理论通常将光学系统能够分辨物距处两个靠近的有间隙点源的能力叫分辨力。常见分辨力有辐射精度分辨力和空间分辨力。辐射精度分辨力是通过其目标辐射光谱范围及其发射率、背景噪声及其发射率计算得到。空间分辨力可通过紫外探测系统的瞬时视场

计算得到。

紫外探测系统的探测概率 P_d、虚警率 P_{fa} 都与系统噪声密切相关。当紫外信号与系统噪声总幅值大于门限电压时，紫外探测系统就会认为发现紫外目标，它发生的概率称为探测概率 P_d。虚警率 P_{fa} 是当系统噪声电压超过系统门限电压时，紫外探测系统就会误认为发现了目标，这种实际目标不存在而系统错误地认为目标存在的情况，称为“虚警”，它发生的概率称为虚警率 P_{fa}。对于紫外探测系统，探测概率 P_d 一般要大于 50%，对于跟踪用途则要大于 90%。虚警率 P_{fa} 通常为 $10^{-6}\sim10^{-12}$，在计算作用距离时，一般可取探测概率 P_d 为 0.96 以上。

5.2　CCD 与 CMOS 传感器

人类通过视觉器官所得到的信息量约占人能摄取的总信息量的 80%以上。CCD 和 CMOS 传感器是当前被普遍采用的两种图像传感器，两者都是利用感光二极管进行光电转换将光像转换为电子数据。自 20 世纪 60 年代末期美国贝尔实验室开发出 CCD 固体摄像器件以来，CCD 技术在图像传感、信号处理、数字存储等方面得到了迅速发展。然而随着 CCD 固体摄像器件的广泛应用，其不足之处逐渐显露出来：生产工艺复杂、功耗较大、价格高、不能单片集成和有光晕、拖尾等不足之处。

为此，人们又开发出了另外几种固体图像传感器，其中最有发展潜力的是采用标准 CMOS 集成电路工艺制造的 CMOS 图像传感器。实际上，早在 20 世纪 70 年代初，国外就已经开发出了 CMOS 图像传感器，但因成像质量不如 CCD，一直无法与之相抗衡。20 世纪 90 年代初，随着超大规模集成电路工艺技术的飞速发展，CMOS 图像传感器在单芯片内集成了 A/D 转换、信号处理、自动增益控制、精密放大和存储等功能，从而极大地改善了设计系统的复杂性、降低了成本，因而显示出强劲的发展势头。此外，CMOS 图像传感器还具有低功耗、单电源、低工作电压(3.3～5.0V)、无光晕、抗辐射、成品率高、可对局部像素随机访问等突出优点。因此，CMOS 图像传感器重新成为研究开发的热点。在军民两用领域，已经同 CCD 图像传感器形成强有力的竞争态势。

5.2.1　CCD 的基本原理及其主要性能指标

为了掌握和应用 CCD，并进行系统设计，就必须了解 CCD 的基本原理和其性能指标。

1. CCD 器件的基本原理

CCD 是一种金属氧化物半导体结构的新型器件，其基本结构是一种密排的 MOS 电容器，能够存储由入射光在 CCD 像敏单元激发出的光信息电荷，并能在适当相序的时钟脉冲驱动下，把存储的电荷以电荷包的形式定向传输转移，实现自扫描，完成从光信号到电信号的转换。这种电信号通常是符合电视标准的视频信号，可在电视屏幕上复原成物体的可见光像，也可以将信号存储在磁带机内，或输入计算机，进行图像增强、识别、存储等处理。因此，CCD 器件是一种比较理想的摄像器件，在很多领域中都有应用。

CCD 是一种光电转换器件，是 20 世纪 70 年代以来逐步发展起来的半导体器件。它是在 MOS 集成电路技术基础上发展起来的，为半导体技术应用开拓了新的领域。它具有光电转换、信息存储和传输等功能，具有集成度高、功耗小、结构简单、寿命长、性能稳定等优

点，故在固体图像传感器、信息存储和处理等方面得到了广泛的应用。CCD 能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展，能给出直观、真实、多层次的内容丰富的可视图像信息，被广泛应用于军事、天文、医疗、广播、电视、传真通信以及工业检测和自动控制系统。实验室用的数码相机和光学多道分析器等仪器，都用了 CCD 作为图像传感元件。

一个完整的 CCD 器件由光敏单元、转移栅、移位寄存器及一些辅助输入、输出电路组成。CCD 工作时，在设定的积分时间内由光敏单元对光信号进行采样，将光的强弱转换为各光敏单元的电荷多少。采样结束后各光敏元电荷由转移栅转移到移位寄存器的相应单元中。移位寄存器在驱动时钟的作用下，将信号电荷顺次转移到输出端。将输出信号接到示波器、图像显示器或其他信号存储、处理设备中，就可对信号再现或进行存储处理。由于 CCD 光敏单元可做得很小（约 10μm 甚至更小），所以它的图像分辨率很高。

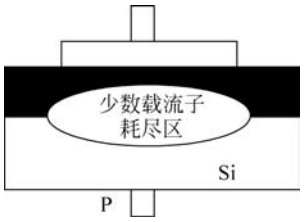


图 5.4　用作少数载流子存储单元的 MOS 剖面图

CCD 的基本单元是 MOS 电容器，这种电容器能存储电荷，其结构如图 5.4 所示。以 P 型硅为例，在 P 型硅衬底上通过氧化在表面形成 SiO_2 层，然后在 SiO_2 上淀积一层金属为栅极，P 型硅里的多数载流子是带正电荷的空穴，少数载流子是带负电荷的电子，当金属电极上施加正电压时，其电场能够透过 SiO_2 绝缘层对这些载流子进行排斥或吸引。于是带正电的空穴被排斥到远离电极处，剩下的带负电的少数载流子在紧靠 SiO_2 层形成负电荷层（耗尽层），电子一旦进入，由于电场作用就不能复出，故又称为电子势阱。

当器件受到光照时（光可从各电极的缝隙间经过 SiO_2 层射入，或经衬底的薄 P 型硅射入），光子的能量被半导体吸收，产生电子-空穴对，这时出现的电子被吸引存储在势阱中，这些电子是可以传导的。光越强，势阱中收集的电子越多，光弱则反之，这样就把光的强弱变成电荷的数量，实现了光与电的转换，而势阱中收集的电子处于存储状态，即使停止光照一定时间内也不会损失，这就实现了对光照的记忆。

2. CCD 传感器的主要性能指标

CCD 器件是一种光电探测器件，它不同于大多数以光电流或电压为信号载体的器件，而是以电荷的形式存储和转移信息。常见的 CCD 传感器包括 CCD 摄像头和图像采集卡。为了全面评价 CCD 成像器件的性能及应用的需要，制定一系列特征参数。一般来说，具体有以下几类的特征参数。

1）表征器件总体性能的特征参数

表征器件总体性能的特征参数有像素数，CCD 几何尺寸（总尺寸及像元尺寸），帧频，光谱特性，信噪比，MTF 和分辨率，动态范围，非均匀性，暗电流，质量、功耗与可靠性（寿命），接口。

2）表征器件内部性能的特征参数

表征器件内部性能的特征参数有转移效率和转移损失率、工作频率（时钟频率的上下限）、光电转换特性与响应度、响应时间、噪声。

3）表征器件工作环境适应性的特征参数

表征器件工作环境适应性的特征参数有工作温度范围、存储温度范围、相对湿度、振动

与冲击、抗霉菌、强辐射等。

下面就 CCD 器件的主要性能指标作进一步分析。

1) CCD 几何尺寸

一般来说，尺寸越大，包含的像素越多，清晰度就越高，性能也就越好。在像素数目相同的条件下，尺寸越大，则显示的图像层次越丰富。

2) CCD 像素

CCD 像素是 CCD 的主要性能指标，它决定了显示图像的清晰程度，分辨率越高，图像细节的表现越好。CCD 是由面阵感光元素组成的，每一个元素称为像素，像素越多，图像越清晰。

3) 灵敏度

灵敏度是指在一定光谱范围内单位曝光量的输出信号电压(电流)，也相当于投射在光敏单元上的单位辐射功率所产生的电压(电流)。

4) 分辨率

分辨率是图像器件的重要特性，常用调制传递函数 MTF 来评价。如图 5.5 所示，为某线阵 CCD 的 MTF 曲线(f 为空间频率)。

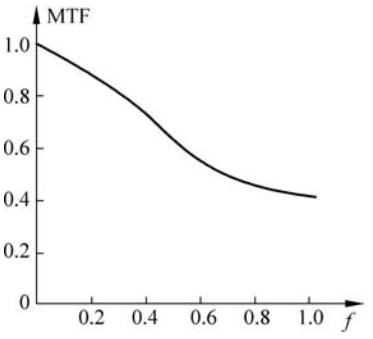


图 5.5　某线阵 CCD 的 MTF 曲线

5) 信噪比

信噪比指的是信号电压对于噪声电压的比值，通常用符号 S/N 来表示。S 表示摄像机在假设无噪声时的图像信号值，N 表示摄像机本身产生的噪声值(比如热噪声)，二者之比即为信噪比，用分贝(dB)表示。信噪比越高越好，典型值为 46dB。

6) 光谱响应

目前广泛应用的 CCD 器件是以硅为衬底的器件，其典型光谱响应范围在 400～1100nm。红外 CCD 器件用多元红外探测器阵列替代可见光 CCD 图像器件的光敏元部分，光敏元部分主要的光敏材料有 InSb、PbSnTe 和 HgCdTe 等，其光谱范围延伸至 3～5μm 和(或)8～14μm。

7) 动态范围

饱和曝光量和等效噪声曝光量的比值称为 CCD 的动态范围，CCD 器件的动态范围一般在 10^3～10^4 数量级。

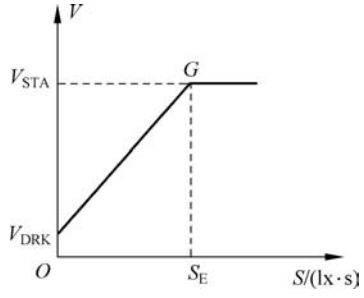


图 5.6　CCD 图像器件的光电转换特性

8) 暗电流

暗电流的存在限制了器件动态范围和信号处理能力。暗电流的大小与光积分时间、周围环境温度密切相关，通常温度每升高 30℃～35℃，暗电流提高约一个数量级。CCD 摄像器件在室温下暗电流为 5～10nA/cm^2。

9) 光电转换性

CCD 图像器件的光电转换特性如图 5.6 所示。图中横轴为曝光量，纵轴为输出信号电压值。它的光

电转换特性与硅靶摄像管相似，具有良好的线性。特性曲线的拐点 G 所对应的曝光量叫饱和曝光量(S_E)，当曝光量大于 S_E 时，CCD 输出信号不再增加，G 点所对应的输出电压 V_{STA} 为饱和输出电压。V_{DRK} 为暗输出电压，即无光照时，CCD 的输出电压值。

10) 转移效率 η 与转移损失率 ε

在一定的时钟脉冲驱动下，设电荷包的原电量为 Q_0，转移到下一个势阱时的电量为 Q_1，则转移效率 η 与转移损失率 ε 分别为

$$\eta = Q_1/Q_0 \tag{5.1}$$

$$\varepsilon = (Q_0 - Q_1)/Q_0 \tag{5.2}$$

一个电量为 Q 的电荷包，经过 n 次转移后的输出电荷量应为

$$Q_n = Q_0\eta^n \tag{5.3}$$

总效率为

$$\eta^n = Q_n/Q_0 \tag{5.4}$$

一个 CCD 器件总效率太低时，就失去了实用价值。一定的 η 值，限定了器件的最大位数(见表 5.2)，这一点对器件的设计者及使用者都是十分重要的。

表 5.2 总效率随 η 值的变化(三相 1024 位器件)

η	0.999 00	0.999 50	0.999 90	0.999 95	0.999 99
Q_n/Q_0	0.1289	0.3591	0.8148	0.9027	0.9797

值得注意的是，转移损失并不是部分信号电荷的消失，而是损失的那部分电荷在时间上的滞后。其后果不仅仅是信号的衰减，更有害的是滞后的那部分电荷叠加到后面的电荷包上，引起传输信息的失真(CCD 传输信号的拖尾情况)。

11) 量子效率

如果说灵敏度是从宏观角度描述 CCD 光电特性，那么量子效率是对同一个问题的微观描述，可以理解为一个光子能产生的电子数。

12) 不均匀度

CCD 成像器件不均匀度包括光敏元不均匀和 CCD 不均匀。一般 CCD 是近似均匀的，即每次转移效率是一样的。光敏元响应不均匀是由工艺过程及材料不均匀引起的，像素越多，均匀性问题越突出，不均匀度是影响像素提高的因素，也是成品率下降的重要原因。

13) 线性度

线性度是指在动态范围内，输入信号与曝光量关系是否呈线性关系。通常在弱信号和接近满阱信号时，线性度比较差。在弱信号时，噪声影响大，信噪比低；在接近满阱信号时，耗尽层变窄，使量子效率下降，灵敏度降低，线性度变差。

以上是对 CCD 图像器件主要性能指标的介绍，除去以上指标之外，影响 CCD 性能的指标还有如影响 CCD 总体性能的功耗与可靠性、质量等；表征 CCD 内部性能的如工作频率、响应时间以及 CCD 器件所处的温度、湿度、所受振动与冲击等环境条件。

5.2.2 CMOS 的基本原理及其主要性能指标

为了掌握和应用 CMOS，并进行系统设计，必须了解 CMOS 的基本原理及其性能指标。

1. CMOS 的基本原理

CMOS 图像传感器的像素结构主要有两种：无源像素图像传感器(PPS)和有源像素图像传感器(APS)，其结构如图 5.7 所示。PPS 出现于 20 世纪 90 年代初。从 1992 年至今，APS 发展非常迅猛。由于 PPS 信噪比低、成像质量差，目前应用的绝大多数 CMOS 图像传感器都采用 APS 结构。APS 结构的像素内部包含一个有源器件，该放大器在像素内部具有放大和缓冲功能，具有良好的消噪功能，且电荷不需要像 CCD 器件那样经过远距离移位到达输出放大器，因此避免了所有与电荷转移有关的 CCD 器件的缺陷。值得一提的是，CMOS 图像传感器新技术已有 C3D 技术和 Foveon X3 技术等。

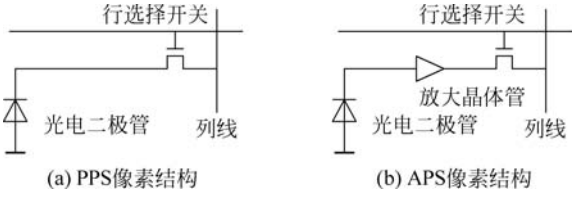


图 5.7　CMOS 的两种像素结构

由于每个放大器仅在读出期间被激发，将经光电转换后的信号在像素内放大，然后用 X-Y 地址方式读出，提高了固体图像传感器的灵敏度。APS 像素单元有放大器，它不受电荷转移效率的限制，速度快，图像质量较 PPS 得到明显改善。但是，与 PPS 相比，APS 的像素尺寸较大、填充系数小，其设计填充系数典型值为 20%～30%。

一个典型的 CMOS 图像传感器的总体结构如图 5.8 所示。在同一芯片上集成有模拟信号处理电路、I^2C(Inter-Integrated Circuit，集成电路总线)控制接口、曝光/白平衡等控制、视频时序产生电路、数字转换电路、行选择、列选及放大、光敏单元阵列。片上模拟信号处理电路主要执行 CDS(Correlated Double Sampling，相关双取样电路)功能。片上 A/D 转换器可以分为像素级、列级和芯片级几种情况，即每一个像素有一个 A/D 转换器、每一列像素有一个 A/D 转换器，或者每一个感光阵列有一个 A/D 转换器。由于受芯片尺寸的限制，像素级的 A/D 转换器不易实现。CMOS 芯片内部提供了一系列控制寄存器，通过总线编程(如 I^2C 总线)来对自动增益、自动曝光、白色平衡、γ 校正等功能进行控制，编程简单、控制灵活。直接输出的数字图像信号可以很方便地和后续处理电路接口，供数字信号处理器对其进行处理。

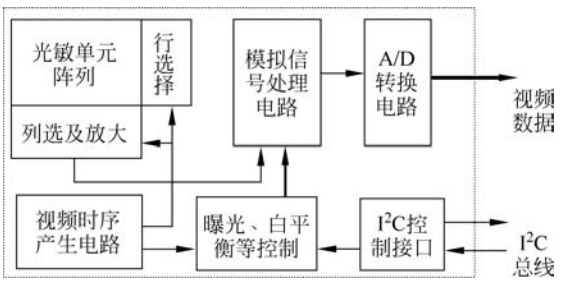


图 5.8　CMOS 芯片组成方框图

CMOS 成像器件将光敏元、放大器、A/D 转换器、存储器及数字信号处理器等全都集成在一个硅片上。每个 CMOS 成像单元都有自己的缓冲放大器，可以被单独选址和读出，这点与 CCD 的信号读出方式截然不同。

2. CMOS 传感器的主要性能指标

下面分析 CMOS 器件的主要性能指标。

1) 传感器尺寸

CMOS 图像传感器的尺寸越大，则成像系统的尺寸越大。CMOS 图像传感器的常见尺寸有 1in、2/3in、1/2in、1/3in、1/4in 等。

2) 像素总数和有效像素数

像素总数是衡量 CMOS 图像传感器的主要技术指标之一。CMOS 图像传感器的总体像素被用来进行有效的光电转换并输出图像信号的像素为有效像素。显而易见，有效像素总数隶属于像素总数集合。有效像素数目直接决定了 CMOS 图像传感器的分辨能力。

3) 最小照度

最小照度是指在使用最大光圈增益、摄取特定目标时视频信号输出幅度为 100IRE 所对应的入射光的最小值。

4) 动态范围

动态范围由 CMOS 图像传感器的信号处理能力和噪声决定，反映了 CMOS 图像传感器的工作范围。参照 CCD 的动态范围，其数值是输出端的信号峰值电压与均方根噪声电压之比，通常用 dB 表示。

5) 灵敏度

图像传感器对入射光功率的响应能力被称为响应度。对于 CMOS 图像传感器来说，通常采用电流灵敏度来反映响应能力，电流灵敏度也就是单位光功率所产生的信号电流：

$$S_d = \frac{I_S}{P_S} \quad (\text{单位为：mA/W}) \tag{5.5}$$

式中，P_S 是入射光功率；I_S 是信号电流，取有效值，即均方根值。有些文献或器件手册中也会采用电压响应度来反映响应能力。电压响应度 R_V 定义为图像传感器的输出信号电压 V_S 与入射光功率 P_S 之比，即单位光功率所产生的信号电压：

$$R_V = \frac{V_S}{P_S} \tag{5.6}$$

光辐射能流密度在光度学中常用照度来表示，可以利用关系式 $1\text{W/m}^2 = 20\text{lx}$。对于一定尺寸的 CMOS 图像传感器而言，电压响应度可用 V/(lx·s)表示，电流灵敏度可用 A/(lx·s)表示。

6) 分辨率

分辨率是指 CMOS 图像传感器对景物中明暗细节的分辨能力。通常用调制传递函数(MTF)来表示，同时也可以用空间频率 lp/mm 来表示。由于 CMOS 图像传感器是离散采样器件，由尼奎斯特定理可知，它的极限分辨率为空间采样频率的一半。如果某一方向上的像元间距为 d，则该方向上的空间采样频率为 $1/d$(单位为 lp/mm)，其极限分辨率将小于 $1/2d$(单位为 lp/mm)。因此 CMOS 图像传感器的有效像素数(行或列)以及 CMOS 传感

器的尺寸(行或列)是衡量分辨率的重要的相关指标。由此可以得到极限分辨率(行或列)=$\frac{\text{有效像素数(行或列)}}{2\times\text{传感器尺寸(行或列)}}$(lp/mm)。

7) 光电响应不均匀性

CMOS图像传感器是离散采样型成像器件,光电响应不均匀性定义为CMOS图像传感器在标准的均匀照明条件下,各个像元的固定噪声电压峰-峰值与信号电压的比值,记为PRNU,即

$$\text{PRNU}=\frac{\text{FPN}}{\text{Signal}}\times 100\% \tag{5.7}$$

固定模式噪声(FPN)是指非暂态空间噪声,产生的原因包括像素与色彩滤波器之间的不匹配、列放大器的波动、PGA与ADC(数模转换器)之间的不匹配等。FPN可以是耦合的或非耦合的。行范围耦合类FPN噪声也可以由较差的共模抑制造成。在实际应用中,由于受到测量的约束,常常将上面的定义等效为:在标准的均匀照明条件下,各个像元的输出电压中的最大值(V_{max})与最小值(V_{min})的差同各个像元输出电压的平均值(V_o)的比值,即

$$\text{PRNU}=\frac{V_{max}-V_{min}}{V_o}\times 100\% \tag{5.8}$$

由于每个像元的输出电压直接对应于输出的灰度值,所以在这里将像元集合中的灰度最大数据作为灰度最大值,记为G_{max};将像元集合中的灰度最小数据作为灰度最小值,记为G_{min};将像元集合中的灰度数据的平均值作为平均灰度值,记为G_o。则上面的计算公式可以通过像元的灰度数据来表示:

$$\text{PRNU}=\frac{G_{max}-G_{min}}{G_o}\times 100\% \tag{5.9}$$

8) 光谱响应特性

CMOS图像传感器的信号电压V_S和信号电流I_S是入射光波长λ的函数。光谱响应特性就是指CMOS图像传感器的响应能力随波长的变化关系,它决定了CMOS图像传感器的光谱范围。通常可以选用光谱特性曲线来描述,其横坐标是波长,纵坐标是灵敏度。CMOS图像传感器的光谱响应的含义与一般的光电探测器的光谱响应相同,指的是相对的光谱响应。CMOS图像传感器的光谱响应范围是由光敏面的材料决定的,本征硅的光谱响应范围为0.4～1.1μm。

5.2.3　CCD和CMOS传感器的比较及发展趋势

CCD和CMOS是两类主流图像传感器,对其进行制造工艺、性能差异的比较,了解其发展趋势,对于掌握、应用这两类图像传感器进行系统设计是必要的。

1. 制造工艺的差异

CCD和CMOS的制造工艺,都是基于MOS的构造,不过从细节来看,两者还是有很大差异。表5.3虽然不能完全适用于所有图像传感器,但是以最常用的隔行转移方式CCD图像传感器及其使用0.35～0.5μm设计法则的CMOS图像传感为例进行了比较。CCD的制造工艺是以光电二极管与CCD的构造为中心,为了垂直CCD与电子快门,大部分使用N型基板。此外,为了驱动CCD必须使用相当高的电压,除了形成较厚的栅极绝缘膜外,同时

CCD转移电极也是多层重叠的构造。在Al遮光膜下，垂直CCD为了充分遮光，抑制漏光，不进行平坦化。

表5.3 制造工艺与特性比较

	CCD图像传感器	CMOS图像传感器
制造工艺	实现光电二极管、CCD特有的构造	基于DMOS(Depletion MOS) LSI的标准制造工艺
基板、阱	N型基板、P-well	P型基板、N-well
元件分离	LOCOS(Local Oxidation of Silicon)或注入杂质	LOCOS
栅极绝缘膜	较厚(50～100nm)	较薄(约10nm或以下)
栅极电极	2～3Poly-Si(重叠构造)	1～2Poly-Si(多晶硅)
层间膜	重视遮光性、光谱特性的构造、材料	重视平坦性
遮光膜	Al，W	Al
配线	1层(与遮光膜共用)	2或3层

对CMOS图像传感器，虽然也使用N型基板，但大多数依照标准的CMOS制造工艺使用P型基板。又由于使用以低电压动作的MOS晶体管，因此形成的栅极绝缘膜较薄。栅极电极使用硅化物类材料，为了达到多层配线的目标，层间膜需要进行平坦化。

2. 性能差异

CCD与CMOS传感器是当前成像设备普遍采用的两种图像传感组件。两种传感器都是利用感光二极管进行光与电转换，将图像信号转换为数字信号，它们的根本差异在于传送信号数据的方式不同。由于信息传送方式不同，CCD与CMOS传感器在效能与应用上存在诸多差异(见表5.4)，这些差异主要具体表现在以下12个方面。

表5.4 CCD与CMOS图像传感器比较

类　　别	CCD	CMOS
生产线	专用	通用
成本	高	低
集成状况	低，需外接芯片	单片高度集成
电源	多电源	单一电源
抗辐射	弱	强
电路结构	复杂	简单
灵敏度	优	良
信噪比	优	良
图像	顺次扫描	同时读取
红外线	灵敏度低	灵敏度高
动态范围	＞70dB	＞70dB
模块体积	大	小

(1) 灵敏度。灵敏度代表传感器的光敏单元收集光子产生电荷信号的能力。CCD图像传感器灵敏度较CMOS图像传感器高30%～50%。这主要因为CCD的感光信号以行为单位传输，电路占据像素的面积比较小，这样像素点对光的感受就高些；而CMOS传感器

的每个像素由多个晶体管与一个感光二极管构成(含放大器与A/D转换电路),使得每个像素的感光区域只占据像素本身很小的表面积,像素点对光的感受就低。CCD像素单元耗尽区深度可达10nm,具有可见光及近红外光谱段的完全收集能力。CMOS图像传感器由于采用0.18～0.5mm标准CMOS工艺,且采用低电阻率硅片须保持低工作电压,像素单元耗尽区深度只有1～2nm,导致像素单元对红光及近红外光吸收困难。

(2) 动态范围。动态范围表示器件的饱和信号电压与最低信号阈值电压的比值。在可比较的环境下,CCD动态范围较CMOS高。主要由于CCD芯片物理结构决定通过电荷耦合,电荷转移到共同的输出端的噪声较低,使得CCD器件噪声可控制在极低的水平。CMOS器件由于其芯片结构决定它具有较多的片上放大器、寻址电路、寄生电容等,导致器件噪声相对较大,这些噪声即使通过采用外电路进行信号处理、芯片冷却等手段,CMOS器件的噪声仍不能降到与CCD器件相当的水平。CCD的低噪声特性是由其物理结构决定的。

(3) 噪声。CCD的特色在于充分保持信号在传输时不失真(有专属通道设计),透过每一个像素集合至单一放大器上做统一处理,可以保持资料的完整性;相对地,CMOS的设计中每个像素旁就直接连着ADC(放大兼模拟/数字信号转换器),信号直接放大并转换成数字信号。CMOS的制造工艺较简单,没有专属通道的设计,因此必须先放大再整合各个像素的资料。所以CMOS计算出的噪点要比CCD多,这会影响到图像品质。

(4) 功耗。CMOS传感器的图像采集方式为主动式,即感光二极管所产生的电荷会直接由晶体管放大输出;而CCD传感器为被动式采集,需外加电压让每个像素中的电荷移动,除了在电源管理电路设计上的难度更高之外,高驱动电压更使其功耗远高于CMOS传感器。CMOS传感器使用单一电源,耗电量非常小。

(5) 响应速度。由于大部分相机电路可与CMOS图像传感器在同一芯片上制作,信号及驱动传输距离缩短,电感、电容及寄生延迟降低,信号读出采用X-Y寻址方式,CMOS图像传感器工作速度优于CCD。通常的CCD由于采用顺序传输电荷,组成相机的电路芯片有3～8片,信号读出速率不超过70MPixels/s。CMOS图像传感器的设计者将模数转换(ADC)做在每个像素单元中,使CMOS图像传感器信号读出速率可达1000MPixels/s以上,比CCD图像传感器快很多。

(6) 响应均匀性。由于硅片工艺的微小变化、硅片及工艺加工引入缺陷、放大器变化等导致图像传感器光响应不均匀。响应均匀性包括有光照和无光照(暗环境)两种环境条件。CMOS图像传感器由于每个像素单元中均有开环放大器,器件加工工艺的微小变化导致放大器的偏置及增益产生可观的差异,且随着像素单元尺寸进一步缩小,差异将进一步扩大,使得在有光照和暗环境两种条件下CMOS图像传感器的响应均匀性较CCD有较大差距。

(7) 集成度。CMOS图像传感器可将光敏单元、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换器、图像信号处理器及控制器等集成到一块芯片上。

(8) 驱动脉冲电路。CMOS芯片内部集成了驱动电路,极大地简化了硬件设计,同时也降低了系统功耗。

(9) 带宽。CMOS具有低的带宽,并增加了信噪比。它还有一个固有的优点是防模糊(Blooming)特性。在像素位置内产生的电压先是被切换到一个纵列缓冲区内,再被传送到输出放大器中。由于电压是直接被输出到放大器中去,因此不会发生传输过程中的电荷损

耗以及随后产生的图像模糊现象。其不足之处是每个像素中的放大器的阈值电压都有着细小差别，这种不均匀性会引起“固定模式噪声”。

(10) 访问灵活性。CMOS 具有对局部像素图像的编程进行随机访问的优点。如果只采集很小区域的窗口图像，则可以实现很高的帧频，这是 CCD 图像传感器很难做到的。

(11) 分辨率。CMOS 传感器比 CCD 传感器具备更加复杂的像素，这使得它的像素尺寸难以实现 CCD 传感器的标准，为此，在比较尺寸一样的 CCD 传感器与 CMOS 传感器的情况下，CCD 传感器可以做得更密，通常有着更高的分辨率。

(12) 成本。由于 CMOS 的集成度高，单个像素的填充系数远低于 CCD。从成本上来说，由于 CMOS 传感器采用半导体电路最常用的 CMOS 工艺，可以轻易地将周边电路，如自动增益控制(Automatic Gain Control，AGC)、CDS、时钟、数字信号处理(Digital Signal Processing，DSP)等，集成到传感器芯片中，因此可以大大地减少外围芯片的费用。此外，在 CCD 应用电荷传递数据的情况下，若存在一个不可以工作的像素，则会阻碍传输整排的数据。为此，与 CMOS 传感器相比，CCD 传感器的成品率更加难以控制。

3. CCD 与 CMOS 的发展趋势

从 CMOS 与 CCD 的应用及技术发展看，未来的发展趋势存在以下两种可能：

(1) CMOS 可能逐渐成为主流。CMOS 与 90%的其他半导体都采用相同标准的芯片制造技术，而 CCD 则需要一种极其特殊的制造工艺，故 CCD 的制造成本高得多。由此看来，具有较高解像率、制作成本低得多的 CMOS 器件将会得到发展。随着 CMOS 图像传感器技术的进一步研究和发展，过去仅在 CCD 上采用的技术正在被应用到 CMOS 图像传感器上，CCD 在这些方面的优势也逐渐消失，而 CMOS 图像传感器自身的优势正在不断发挥，其光照灵敏度和信噪比可达到甚至超过 CCD。基于此，可以预测，CMOS 图像传感器将会在很多领域取代 CCD 图像传感器，并开拓出新的更广阔的市场。

(2) CCD 与 CMOS 技术互相结合。研究人员做成了 CCD 和 CMOS 混合的图像传感器——BCMD(体电荷调制器件)，兼有 CCD 和 CMOS 技术两者的优点，即低成本和高性能。BCMD 传感器利用了这两种传感器的长处但不继承它们的缺点，因而消除了许多障碍。主要优点有：

① 消除了 CCD 图像传感器的驱动要求；

② 可以实现单片系统集成和简化的电源设计，成本低；

③ 暗电流很小，暗电流的减小得益于所谓的表面态锁定技术；

④ 低噪声，是由于采用了相干性双取样电路，这种电路能有效抑制由于器件失配而引起的像素固定模式噪声和消除复位噪声；

⑤ 采用工业标准的 5V 和 3.3V 电源，淘汰了 CCD 所需的复杂、昂贵的非标准电源电压。

具体来说，CCD 和 CMOS 的发展趋势如下：

1) CCD 器件的发展趋势

经过多年的发展，CCD 图像传感器从最初的 8 像元移位寄存器发展至今已具有数百万至上千万像元。由于 CCD 具有很大的潜在市场和广阔的应用前景，因此近年来国际上在这方面的研究工作进行的相当活跃。近些年出现了超级 CCD 技术(Super CCD)、X3CCD(多层感色 CCD)技术、四色滤光 CCD 技术等。从 CCD 的技术发展趋势来看，主要有以下几个

方向：

(1) 高分辨率。CCD 像元数已从 100 万提高到了 4000 万以上，大面阵、小像元的 CCD 摄像机层出不穷。

(2) 高速度。在某些特殊的高速瞬态成像场合，要求 CCD 具有更高的工作速度和灵敏度。CCD 的频率特性受电荷转移速度的限制，时钟脉冲电压变化太大，电荷来不及完全转移，致使转移效率大幅度降低。为保证器件具有较高的转移效率，时钟电压变化必须有一个上限频率，即 CCD 的最高工作频率。因此，提高电荷转移效率和提高器件频率特性是提高 CCD 质量的关键。

(3) 微型、超小型化。微型、超小型化 CCD 的发展是 CCD 技术向各个领域渗透的关键。随着国防科技、生物医学工程、显微科学的发展，十分需要超小型化的 CCD 传感器。

(4) 新型器件结构。为提高 CCD 像传感器性能，扩大其使用范围，就需要不断地研究新的器件结构和信号采集、处理方法，以便赋予 CCD 图像传感器更强功能。在器件结构方面，有帧内线转移 CCD(FIT CCD)、虚像 CCD(VP CCD)、亚电子噪声 CCD(NSE CCD)、TDI-CCD(即时间延迟积分 CCD)、EMCCD 等。

(5) 微光 CCD。由于夜空的月光和星光辐射主要是可见光和近红外光，其波段正好是在硅 CCD 的响应范围，因此 CCD 刚一诞生，美国以 TI、仙童为代表的一些公司就开始研制微光 CCD，如增强型 CCD(ICCD)。目前微光 CCD 最低照度可达 10^{-6}lx，分辨率优于 510TVL。

(6) 多光谱 CCD 器件。除可见光 CCD 以外，红外及微光 CCD 技术也已得到应用。正在研究 X 射线 CCD、紫外 CCD、多光谱红外 CCD 等，都将拓展 CCD 应用领域。

2) CMOS 器件的发展趋势

CMOS 图像传感器的研究热点主要有以下几个方面：

(1) 多功能、智能化。传统的图像传感器仅局限于获取被摄对象的图像，而对图像的传输和处理需要单独的硬件和软件来完成。由于 CMOS 图像传感器在系统集成上的优点，可以从系统级水平来设计芯片。如可以在芯片内集成相应的功能部件应用于特定领域，如某公司开发的高质量手机用摄像机，内部集成了 ISP(Image Signal Processing)，并整合了 JPEG 图像压缩功能。也可以从通用的角度考虑，在芯片内部集成通用微处理器。为了消除数字图像传输的瓶颈，还可以将高速图像传输技术集成到同一块芯片上，形成片上系统型数字相机和智能 CMOS 图像传感器。另外，在新的图像处理算法、体系结构、电路设计以及单片 PDC(Programmable Digital Camera)的研究方面取得了一些令人瞩目的成果。

(2) 高帧速率。由于 CMOS 图像传感器具有访问灵活的优点，所以可以通过只读出感光面上感兴趣的很小区域来提高帧速率。同时，CMOS 图像传感器本身在动态范围和光敏感度上的提高也有利于帧速率的提高。

(3) 宽动态范围。有研究将用于 CCD 的自适应敏感技术用于 CMOS 传感器中，使 CMOS 传感器的整个动态范围可达 84dB 以上，并在芯片上进行了实验；还致力于将 CCD 的工作模式用于 CMOS 图像传感器中。

(4) 高分辨率。CMOS 图像传感器的最高分辨率已达 3170×2120 像素(约 616 万像素)。

(5) 低噪声技术。用于科学研究的高性能 CCD 能达到的噪声水平为 3～5 个电子，而

CMOS 图像传感器则为 300～500 个电子。有实验室采用 APS 技术的图像传感器能达到 14 个电子。

(6) 模块化、低功耗。由于 CMOS 图像传感器便于小型化和系统集成，所以可以根据特定应用场合，将相关的功能集成在一起，并通过优化设计进一步降低功耗。

总之，CMOS 图像传感器正在向高灵敏度、高分辨率、高动态范围、集成化、数字化、智能化的“片上相机”解决方案方向发展。芯片加工工艺不断发展，从 0.5μm→0.35μm→0.25μm→0.18μm，接口电压也在不断降低，从 5V→3.3V→2.5V/3.3V→1.8V/3.3V。研究人员致力于提高 CMOS 图像传感器的综合性能，缩小单元尺寸，调整 CMOS 工艺参数，将数字信号处理电路、图像压缩、通信等电路集成在一起，并制作滤色片和微透镜阵列，以实现低成本、低功耗、低噪声、高度集成的单芯片成像微系统。随着数字电视、可视通信产品的增加，CMOS 图像传感器的应用前景会更加广阔。

5.2.4 CCD 在微光电视和紫外成像系统中的应用

CCD 图像传感器在多类成像系统中有重要应用，这里介绍在微光电视和紫外成像系统中的应用。

1. CCD 图像传感器在微光电视系统中的应用

近 30 年来，CCD 图像传感器的研究取得了惊人的进展，它已经从最初简单的 8 像元移位寄存器发展至具有数百万至上千万像元。随着观察距离的增加和要求在更低照度下进行观察，对微光电视系统的要求越来越高，因此必须研制新的高灵敏度、低噪声的摄像器件，CCD 图像传感器灵敏度高和低光照成像质量好的优点正好迎合了微光电视系统这一发展趋势。作为新一代微光成像器件，CCD 图像传感器在微光电视系统中发挥着关键的作用。

1) CCD 微光电视系统的组成

CCD 微光电视系统的组成如图 5.9 所示。

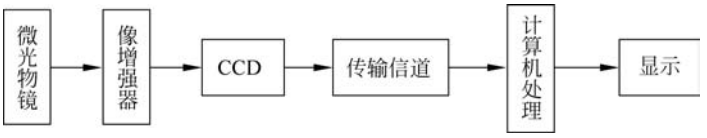


图 5.9 CCD 微光电视系统组成结构图

2) 像增强器与 CCD 的耦合

现在，单独的高灵敏度 CCD 器件虽然可以在低照度环境下工作，但要将 CCD 单独应用于微光电视系统还不可能。因此，可以将微光像增强器与 CCD 进行耦合，让光子在到达 CCD 器件之前使光子先得到增益。微光像增强器与 CCD 耦合方式有 3 种。

(1) 光纤光锥耦合方式。

光纤光锥也是一种光纤传像器件，它一头大，另一头小，利用纤维光学传像原理，可将微光管光纤面板荧光屏(通常，有效孔径 Φ 为 18mm、25mm 或 30mm)的输出经增强的图像耦合到 CCD 光敏面(对角线尺寸通常是 12.7mm 或 16.9mm)上，从而可达到微光摄像的目的，如图 5.10 所示。

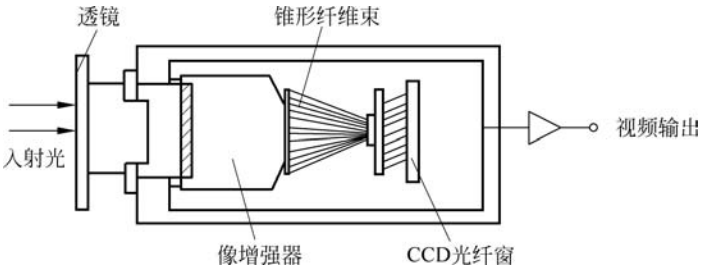


图 5.10　光纤光锥耦合方式结构图

这种耦合方式的优点是荧光屏光能的利用率较高，理想情况下，仅受限于光纤光锥的漫射透过率(≥60%)。缺点是需要带光纤面板输入窗的 CCD；对于背照明模式 CCD 的光纤耦合，有离焦和 MTF 下降问题；此外，光纤面板、光锥和 CCD 均为若干个像素单元阵列的离散式成像元件，因而，三阵列间的几何对准损失和光纤元件本身的疵病对最终成像质量的影响等都是值得认真考虑并予严格对待的问题。

(2) 中继透镜耦合方式。

采用中继透镜也可将微光管的输出图像耦合到 CCD 输入面上，其优点是调焦容易，成像清晰，对正面照明和背面照明的 CCD 均可适用；缺点是光能利用率低(≤10%)，仪器尺寸稍大，对系统杂光干扰问题需特殊考虑和处理。

(3) 电子轰击式 CCD(即 EBCCD)。

前两种耦合方式的共同缺点是微光摄像的总体光量子探测效率及亮度增益损失较大，加之荧光屏发光过程中的附加噪声，使系统的信噪比特性不甚理想。为此，人们发明了电子轰击 CCD(Electron Bombardment CCD，EBCCD)，即把 CCD 做在微光管中，代替原有的荧光屏，在额定工作电压下，来自光阴极的(光)电子直接轰击 CCD。实验表明，每 3.5eV 的电子就可在 CCD 势阱中产生一个电子-空穴对；10kV 工作电压下，增益达 2857 倍。如果采用缩小倍率电子光学倒像管(例如，倍率 $m=0.33$)，则可进一步获得 10 倍的附加增益，即 EBCCD 的光子-电荷增益可达 10^4 以上；而且，精心设计、加工、装调的电子光学系统，可以获得较前两种耦合方式更高的 MTF 和分辨率特性，无荧光屏附加噪声。因此，如果选用噪声较低的 DFGA-CCD(DFGA 为 Distributed Floating Gate Amplifier 的缩写，即分布式浮栅放大器)并入 $m=0.33$ 的缩小倍率倒像管中，有望实现景物照度≤2×10^{-7}lx 光量子噪声受限条件下的微光电视摄像。

微光电视系统的核心部件是像增强器与 CCD 器件的耦合。中继透镜耦合方式的耦合效率低，较少采用。光纤光锥耦合方式适用于小成像面 CCD。

耦合 CCD 器件的性能由像增强器和 CCD 两者决定，光谱响应和信噪比取决于前者，暗电流、惰性、分辨率取决于后者，灵敏度则与两者有关。

2. CCD 图像传感器在紫外成像系统中的应用

紫外成像系统的组成结构图与 CCD 微光电视系统组成结构图(见图 5.9)相似，只不过相应采用紫外物镜、紫外像增强器、紫外 ICCD 或紫外 ICMOS(Intensified CMOS，增强 CMOS)，另外增加“日盲”紫外滤光片。像增强器与 CCD 的耦合方式一般有光纤光锥耦合、直接耦合、镜头耦合。读出帧频(f/s)从 25f/s 可到 1000f/s，甚至更大。

紫外线的波长范围是40～400nm，太阳光中也含紫外线，但由于地球的臭氧层吸收了部分波长的紫外线，实际上辐射到地面上的太阳紫外线波长大都在300nm以上，低于300nm的波长区间被称为“日盲”区。利用这一特性，紫外成像系统在电力故障检测等方面具有重要应用。

在高压设备电离放电时，根据电场强度（或高压差）的不同，会产生电晕、闪电或电弧。电离过程中，空气中的电子不断获得和释放能量。当电子释放能量即放电时，会辐射出光波和声波，还有臭氧、紫外线、微量的硝酸等。紫外成像系统就是利用特殊的仪器接收放电产生的紫外线信号，经处理后成像并可与可见光图像叠加，达到确定电晕的位置和强度的目的，从而为进一步评价设备的运行情况提供依据。

紫外成像系统利用紫外线束分离器将输入的影像分离成两个部分。它用日盲光滤光器过滤掉太阳光，并将第一部分的影像传送到一个影像放大器上，因为电晕放电会发射出230～405nm范围内的紫外线，而紫外光滤波器的工作范围为240～280nm，这个比较窄的波长范围内产生的影像信号也比较微弱（因为电晕信号只包括很少的光子），因此影像放大器的工作是将微弱的影像信号变成可视的影像。因为没有太阳光辐射的影响，所以可以得到高清晰的图像。影像放大器将紫外光影像发送到一个装有CCD的装置中，而同时被探测目标的影像被发送到第二个标准的视频CCD装置中，经过特殊的影像处理工艺将两个影像叠加起来，最后生成显示绝缘子、导线或其他输电线路元件及其电晕的图像。

由于电晕一般在正弦波的波峰或波谷产生，且高压设备的电晕在放电初期总是不连续、瞬间即逝的，紫外成像系统根据电晕的这个特性，在观测电晕时，有两种模式供选择。一种是活动模式，实时观察设备的放电情况，并实时显示一个与一定区域内紫外线光子总量成比例关系的数值，便于定量分析和比较分析。另一种是集成模式，将一定时间区域内（该区域长短可调）的紫外线光子显示并保留在屏幕上，按照先进先出和动态平均的算法实时更新。该模式下若正确调节仪器，则可清楚地看到设备放电区域的形状和大小。

实践表明，紫外成像系统能有效、直观地观测到高压设备放电的情况，为故障检测提供了新的诊断手段，且发展到了可在白天进行检测的水平，技术上完全可以达到观察放电的目的。紫外成像系统还可与红外成像系统互补，紫外检测放电异常，红外检测发热异常，原理不同，各自具有不可互替的优点，检测目的、应用方法也各具特色。这两项技术的结合应用，将会增强高压设备故障点的全面检测能力，完善电力系统的故障检测系统。融合CCD（CMOS）的紫外成像系统在高压设备故障检测中还有更多应用有待拓展。值得一提的是，紫外成像系统在导弹紫外告警、紫外制导、紫外成像辅助导航等军事方面也有许多应用。

3. 存在的问题及解决途径

从成像的要求考虑，最主要的是要提高器件的信噪比。为此应降低器件噪声（即减少噪声电子数）和提高信号处理能力（即增加信号电子的数量）。可以采用制冷CCD和EBCCD两种方法。其主要目的是在输出信噪比为1时尽可能减少成像所需的光通量。

满足电视要求50～60f/s（f/s为帧/秒）的CCD在室温下有明显的暗电流，它将使噪声电平增加。在消除暗电流尖峰的情况下，暗电流分布的不均匀也会在输入光能减少时产生一种噪声的“固定图形”。此外，在高帧频工作时，还不希望减少每个像元信号的利用率。器件制冷会使硅中的暗电流明显改善。每冷却8℃噪声将下降一半。用普通电气制冷到－20℃～－40℃时，暗电流是室温下的1%～1‰，但这时其他噪声就变得突出了。

尽管 CCD 图像传感器至今被公认为低照度成像最有前景的器件，尤其在小信号的情况下，对低照度成像系统电荷转移效率不是主要限制，主要限制还是输出放大器和低噪声输出检测器，因此，必须了解成像的低噪声检测情况。配合制冷，采用浮置栅放大器的低噪声输出，CCD 的检测效果更为理想。

5.3　红外凝视成像系统

红外探测系统可分为红外成像系统和红外非成像系统两类，进一步又有主动探测、被动探测以及主/被动探测之分。红外探测器为其核心，其作用是把接收到的红外辐射能转变成其他形式的能量，在多数情况下是转变成电能，或是变成另一种可测量的物理量，如电压、电流或探测材料其他物理性质的变化。

红外成像技术，顾名思义，是对红外辐射成像的技术，涵盖了红外光学、材料科学、电子学、微机械工程技术、集成电路技术、图像处理算法等诸多技术。红外成像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。而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，是世界先进国家都在竞相研究和发展的高新技术。

红外凝视成像是指在所要求覆盖的范围内，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成像，即指采用红外焦平面阵列探测器的红外成像。红外凝视成像是特定的红外成像。换句话说，红外凝视成像完全取消了光机扫描，采用像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。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的无光机扫描机构的系统即为红外凝视成像系统。

红外焦平面列阵(Infrared Focal Plane Array，IRFPA)探测器是将红外探测器与信号处理电路结合在一起，并将其设置在光学系统焦平面上，是将 CCD、CMOS 技术引入红外波段所形成的新一代红外探测器，是现代红外成像系统的关键器件。而“凝视”是指红外探测器响应景物或目标的时间与取出列阵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”，称为“凝视”。

由于景物中的每一点对应一个探测器单元，凝视列阵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，给使用者带来了极大的方便。

5.3.1　红外凝视成像系统的组成、工作原理与特性分析

本节主要分析红外凝视成像系统的组成、工作原理、光学系统的技术特点、IRFPA 探测器、制冷与制冷器等。

1. 红外凝视成像系统的组成

红外凝视成像系统一般由红外光学系统、IRFPA 探测器、信号放大和处理与显示记录系统等组成。其组成方框图如图 5.11 所示。

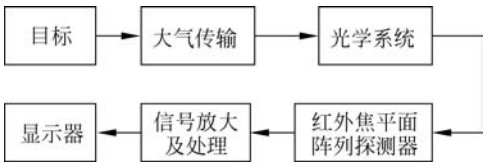


图 5.11 红外凝视成像系统组成方框图

2. 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会聚到红外探测器上，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、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照片和伪彩色照片或电视图像。这种图像不像可见光照相机所得的图像那样直观，它反映的是目标的辐射温度分布。

也就是说，红外成像系统为了获取景物图像，首先将景物进行空间分解，然后依次将这些单元空间的景物温度转换成相应的时序视频信号。凝视红外成像系统中信号放大和处理的基本任务是：放大探测器输出的电信号，形成于景物温度相应的视频信号，如要测温，还要根据景物各单元对应的视频信号标出景物各部分的温度。为了提高图像质量和测温精度，需要对探测器输出的信号进行必要的补偿、校正、转换、量化及伪彩色编码等处理，然后按一定的格式进行显示。实时图像处理基本上用硬件来实现。

要将时序视频信号转换成景物的二维图像，必须经过同步复扫，最后完成热图像的显示。常用的显示方式有电视兼容显示、LED 显示、阴极射线管显示、液晶显示器显示等。

3. 红外光学系统

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特点：

(1) 红外辐射源的辐射波段一般位于 1μm 以上的不可见光区，普通光学玻璃对 2.5μm 以上的光波不透明，而在所有可能透过红外波段的材料中，只有几种材料有需要的机械性能，并能得到一定的尺寸，如锗(用于 MWIR 和 LWIR)、硅(用于 MWIR)、蓝宝石(用于从远 UV 到 MWIR)、硫化锌(用于 MWIR 和 LWIR，如果经热压而成，则可用于从可见光到 LWIR)、三硫化砷(用于 MWIR 和 LWIR)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) 8～14μm 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振动条件下，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(分辨率)。

传统红外光学系统结构形式，一般可分为反射式、折射式(透射式)和折反射式 3 种，后两种结构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)等。

4. IRFPA 探测器及探测器性能参数

红外探测器的种类很多,分类方法也很多。如根据探测谱段,可分为近红外、短波、中波、长波、甚长波红外探测器;根据工作温度,可分为低温、中温和室温探测器;根据器件像元数方式,还可以分为单元、线阵和面阵探测器。根据光谱信息,可分为能量探测和相位及偏振探测。红外探测器可以是成像型的,也可以是非成像型的;根据集成形式可分为红外焦平面探测器和红外非焦平面探测器;按工作转换机理又可分为热探测器和光子探测器两类;从结构上分,有三维结构、量子阱、超晶格等;从材料上分,有碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride,MCT,HgCdTe)、锑化铟(InSb)、氧化钒(VO_X)等探测器。由此可知,红外焦平面探测器是红外探测器的特定类别。

作为成像系统的核心部件,IRFPA 探测器由红外探测器与读出电路(Readout Integrated Circuit,ROIC)两部分组成,其中红外探测器是先进的成像传感器,其主要作用是收集目标的红外辐射信息,将光信号转换为可测量的电信号,然后经过 ROIC 的放大、采样、降噪、模数转换等操作后输出。

根据不同的分类标准,红外焦平面探测器可划分如下。

1) 按制冷方式划分

IRFPA 探测器可分为两大类:制冷 FPA 探测器和非制冷 FPA 探测器。制冷型红外焦平面探测器的优势在于灵敏度高,能够分辨更细微的温度差别,探测距离较远,主要应用于高端军事装备。非制冷红外焦平面探测器无需制冷装置,能够工作在室温状态下,具有体积小、质量轻、功耗小、寿命长、成本低、启动快等优点。虽然在灵敏度上不如制冷型红外焦平面探测器,但非制冷红外焦平面探测器的性能已可满足部分军事装备及绝大多数民用领域的技术需要。近年来,随着非制冷红外焦平面探测器技术的不断进步和制造成本的逐渐下降,其性价比快速提升,为推动非制冷红外焦平面探测器的大规模市场应用创造了良好条件。

制冷型 IRFPA 主要有 HgCdTe、硅化铂(PtSi)、InSb 和砷铝化镓/砷化镓(GaAlAs/GaAs)等。

非制冷 IRFPA 主要有铟镓砷/磷化铟(InGaAs/InP)、VO_X、多晶硅及热释电焦平面阵列等。

(1) 铟镓砷在室温下即可稳定工作,光谱响应为 0.9～3μm;

(2) 氧化钒、多晶硅及热释电焦平面阵列,光谱响应为 8～14μm,需使用半导体制冷器保持温度恒定。

非制冷 IRFPA 属于热探测器,典型代表有微测辐射热计和热释电焦平面探测器。

2) 按工作原理划分

根据光电转换机理,IRFPA 探测器可分为热探测器和光子探测器。热探测器是利用物体热辐射产生的热效应实现光电转换,与入射波长无关,对不同波长入射探测灵敏度相同;其制造工艺相对简单、成本低,但响应速度慢、灵敏度不高,光子探测器对入射波长敏感,具有选择性,以光电效应为基础;其灵敏度高、响应速度快,工作在低温环境,通常需要制冷。

3) 按结构划分

IRFPA 包括红外探测器和 ROIC 两部分,根据其结构和具体形成过程,又可分为单片

式和混合式两种类型：

(1) 单片式类型，ROIC 和探测器使用的材料相同，且都集成在同一片硅衬底上；

(2) 混合式类型，ROIC 和探测器两者材料不同，并按一定结构形式契合而成，包括倒装式结构和 Z 平面结构。

4) 按成像方式划分

按照成像方式可分为扫描型和凝视型。扫描型成像器件通过串行方式读取电信号，按一定频率将逐行采集的数据整理成二维图像，其结构较复杂、灵敏度低；而凝视型成像器件是二维焦平面，通过并行方式读取电信号，直接记录数据便可生成二维图像，性能比扫描型要高，但 ROIC 设计相对复杂、成本较高。

5) 按波段划分

由于红外辐射存在 3 个大气窗口，因此，以红外探测器的光谱响应范围来划分，产生了短波、中波及长波这 3 种红外探测器。

中波红外焦平面阵探测器是最成熟的探测器产品，最早的 PtSi 中波红外焦平面阵探测器已逐渐由 InSb 和 MCT 中波 IRFPA 探测器所取代。长波 IRFPA 探测器主要有 MCT，它是今后继续研究和发展的热点之一。大力研究与开发非制冷焦平面阵探测器技术与产品以及应用是当前红外技术的热点之一，自 1991 年以来，非制冷的 IRFPA 及其在红外成像系统中的应用已取得惊人成就。最成熟的是混合型铁电－热电效应 FPA[混合铁电-热电(微)测辐射热计]。市场上已出现大量商用非制冷 IRFPA 探测器热像仪。

探测器的主要性能参数有响应率(度)、响应时间、噪声等效功率、探测率(D)和比探测率(D^*)、光谱响应等。

1) 响应度 $\Re$

响应度是描述入射到探测器上的单位辐射功率所产生信号大小能力的性能参数。其定义是，红外辐射垂直入射到探测器光敏单元上时，探测器的输出信号电压的均方根值 V_s 或电流响应度 I_s 与入射辐射功率的均方根值 P_s 之比。

2) 噪声等效功率(NEP)

当红外辐射信号入射到探测器响应平面上时，若该辐射功率所产生的电输出信号的均方根值正好等于探测器本身在单位带宽内的噪声均方根值，则这一辐射功率均方根值就称为探测器的噪声等效功率 NEP，与 NEP 类似的性能参数是噪声等效辐照度(NEI)，其表示系统输出信噪比为 1 时的输入辐照度。

3) 探测率 D 和比探测率 D^*

噪声等效功率表征了探测器所能探测的最小辐射功率的能力，此值越小，表示探测器的性能越好。这不符合一般的习惯，所以又引入了探测率这个参数，它是 NEP 的倒数。显然，NEP 越小，D 越大，探测器性能越优。但是，大多数红外探测器的 NEP 与光敏面积的平方根成正比，还与放大器的带宽 Δf 有关。所以，用 NEP 的数值很难比较两个不同探测器性能的优劣。为此，在 D 的基础上引入了归一化的比探测率 D^* 来描述探测器的性能。

4) 响应时间

响应时间是指探测器将入射辐射转变为电输出的弛豫时间，是表示探测器工作速度的一个定量参数。当一定功率的辐射突然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。当辐射突然清除时，输出电压

也要经过一定时间才能下降到辐射照射前的值。在大多数情况下，信号按$(1-e^{-t/\tau})$的规律上升或下降，其中τ定义为探测器的响应时间或时间常数，即输出信号电压从零值上升到最大值的63%所需的时间。现代光子探测器的时间常数很短，可达微秒或纳秒数量级。

5）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，叫探测器的光谱响应，通常用单色辐射的响应度$\Re(\lambda)$或光谱比辐射D_λ^*对波长作图来描述。

光子探测器和热探测器的光谱响应曲线是不同的。热探测器的响应只与吸收的辐射功率有关，而与波长无关，因为其温度的变化只取决于吸收的能量。

5. 制冷器与冷光阑

制冷红外焦平面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；杜瓦瓶实际上就是绝热的容器（真空瓶），类似于传统的“保温瓶”。如图5.12所示为通用探测器/杜瓦瓶组件的剖视图。

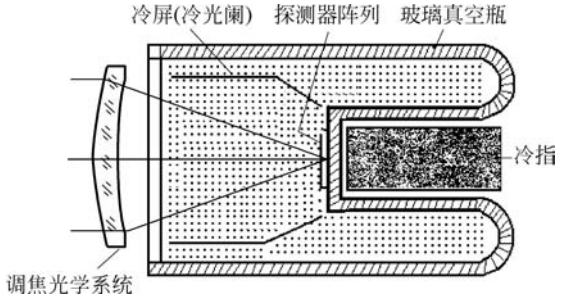


图5.12　通用探测器/杜瓦瓶组件的剖视图

“冷指”贴向探测器，并使之冷却。这种冷指是一种用气罐或深冷泵冷却至深冷的元件。进一步说，冷指自身是一根由铁或钢制造的高比热金属棒，它被线管缠绕包围，液氮不断被泵浦通过线管（或其他类似操作），如此循环，使探测器制冷。

透过红外线的杜瓦窗起到真空密封的作用。图5.12中所示的“冷屏”（或“冷光阑”），自身实际上没有辐射，是杜瓦瓶组件不可分割的一部分。冷屏后表面上的低温呈不均匀分布（尽管只比探测器阵列的温度略高），因此会发射少许热能，或不发射。冷屏的作用是限制探测器观察的立体角，抑制杂散光。其作用效果可用冷光阑效率表示。

冷光阑效率是指景物对探测器的立体角与冷光阑口径对探测器的立体角之比。如果探测器只能探测到来自景物的能量，则称该红外系统具有100%冷光阑效率。图5.13下面的图是上面虚线圈内区域的放大图，图5.13(a)和图5.13(b)分别示出了非100%冷光阑效率和100%冷光阑效率的两个系统。如果把眼睛放在FPA的下端并朝向景物观察，图5.13(a)可以看到非景物（杂散光）。

对于制冷器，还有气体节流式制冷器、斯特林循环制冷器和半导体制冷器等，制冷器的制冷原理主要有相变制冷、焦耳-汤姆逊效应制冷、气体等熵膨胀制冷、辐射热交换制冷和珀尔帖效应制冷。采用何种制冷器，需视系统结构、所用探测器类型和使用环境而定。

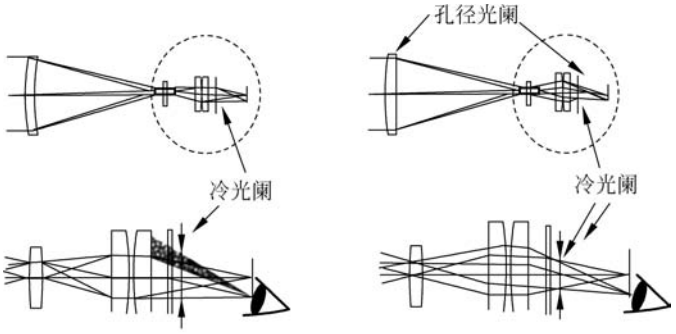


图 5.13 冷光阑示意图

5.3.2 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 3 个常用重要指标。

1. 噪声等效温差

NETD 定义为: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 ΔT。其表达式为

$$\mathrm{NETD}=\frac{\Delta T}{V_S/V_N} \tag{5.10}$$

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

$$\mathrm{NETD}=\frac{4F^2(\Delta f_n)^{1/2}}{\pi A_d^{1/2} n_s^{1/2}\tau_a\tau_o\int_{\Delta\lambda} D_\lambda^*(f_1)L'_{\lambda T}\,\mathrm{d}\lambda} \tag{5.11}$$

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($\mathrm{W/(cm^2\cdot rad\cdot \mu m)}$),$L'_{\lambda T}=\pi^{-1}\cdot\dfrac{\partial M(\lambda,T)}{\partial T}$,$M(\lambda,T)$ 为(黑体)目标的光谱辐射出射度;$D_\lambda^*(f_1)$ 为信号频率 f_1 时,探测器的光谱探测率($\mathrm{cm\cdot Hz^{1/2}/W}$);$n_s$ 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

$$\mathrm{NETD}=\frac{2F(\Delta f_n)^{1/2}}{\pi A_d^{1/2} n_s^{1/2}\eta_{cs}^{1/2}\eta_q^{1/2}\tau_a\tau_o\int_{\Delta\lambda} D_\lambda^{**}(f_1)L'_{\lambda T}\,\mathrm{d}\lambda} \tag{5.12}$$

式中,η_{cs} 为冷屏蔽效率;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

$$D_\lambda^*(f_1)=2F\eta_{cs}^{1/2}\eta_q^{1/2}D_\lambda^{**}(f_1) \tag{5.13}$$

2. 最小可分辨温差

MRTD定义为：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(见图5.14)，T 为目标温度，T_B 为背景温度，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

$$MRTD=3\frac{NETD}{MTF_s}f_T\left\{\frac{\alpha\beta}{T_e\dot{F}\tau_d\Delta f_n}\right\}^{1/2} \tag{5.14}$$

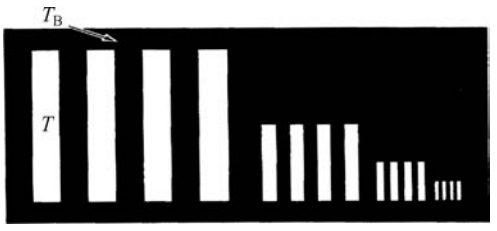


图5.14　用于MRTD测定的目标

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

$$MDTD(f_T)=\sqrt{2}SNR_{DT}\left(\frac{NETD}{I(x,y)}\right)\left(\frac{f_T\beta Q(f_T)}{T_e\dot{F}\Delta f_n}\right)^{1/2} \tag{5.15}$$

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：

$$Q(f_T)=\int_0^\infty g^2(f_T)H_e(f_T)H_m(f_T)H_{ey}(f_T)\mathrm{d}f_T \tag{5.16}$$

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、人眼的MTF。

5.3.3　凝视成像系统的优点

以前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，线阵探测器仍需采用二维扫描，使系统结构复杂，而凝视型焦平面列阵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

$$\tau_{cs}=\frac{\eta_s\alpha\beta}{ABF'} \tag{5.17}$$

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。

相应的信号通道频带宽度为

$$\Delta f_{is}=\frac{\pi}{4}\frac{1}{\tau_{cs}}=\frac{\pi}{4}\frac{ABF'}{\eta_s\alpha\beta} \tag{5.18}$$

若使用 $n_h\times n_v$ 个探测器单元，则驻留时间为

$$\tau=n_h n_v\tau_{cs} \tag{5.19}$$

频带宽度为

$$\Delta f=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{1}{\tau}=\frac{1}{n_h n_v}\Delta f_{is} \tag{5.20}$$

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

$$(\mathrm{NETD})_{si}=k\frac{F^2}{A_d^{1/2}\tau_o D_P^*}\left(\frac{ABF'}{\alpha\beta\eta_s}\right)^{1/2} \tag{5.21}$$

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

$$(\mathrm{NETD})_{si}=k\frac{F^2}{A_d^{1/2}\tau_o D_P^*}\left(\frac{F'}{n_h\times n_v}\right)^{1/2} \tag{5.22}$$

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

从式(5.21)和式(5.22)可以看出，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 个分辨单元的图像，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

$$\tau=n\times\frac{T_F}{N}\times\eta_s \tag{5.23}$$

式中，T_F 为帧周期；η_s 为扫描效率。

例如，$T_F=(1/20)$s，$N=500\times500$ 像元，假定扫描效率为 100%，则单元探测器扫描的驻留时间为 0.2μs。而对 $n=100\times100$ 元的探测器，驻留时间增加到 2000μs，大大降低了探测器响应速度；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 $\tau=0.2\mu$s 时，单个探测器的帧周期为(1/20)s；而 $n=100\times100$ 元的探测器的帧周期 $T_F=(1/200\,000)$s，提高扫描速度近一万倍。

由于凝视型成像大大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微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。

5.3.4　IRFPA 非均匀性产生的原因及其校正

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，与传统的光机扫描红外成像系统相比，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，正是由于它的存在又限制了凝视红外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）是最关键的因素之一，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 $1/f$ 噪声等诸因素所造成的像质的下降。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 NUC 来说是十分重要的。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有以下 6 种：

（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。$1/f$ 噪声为一个非平稳随机过程。

（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非均匀性的原因有很多,但总体上可分为两类:第一类是与探测器本身性能有关;第二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,增加了对它进行校正的难度,至今红外探测器成像的 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,但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情况(如末制导),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) 高通滤波算法要求目标在像平面上处于不断的移动之中,这样才能保证目标不被滤除。

(3) 每一个像素点的滤波都是彼此独立的,因此高通滤波校正算法易于用硬件并行实现。

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 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。

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。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NUC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。可校正系数 $c=\sqrt{\frac{\sigma_t^2}{\sigma_n^2}-1}$，其中，$\sigma_t^2$ 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4种表示方法，区别仅在于考查的角度不同，其实质是一样的。

5.3.5　红外凝视系统中的微扫描

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，一般会产生空间欠抽样图像，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。微扫描利用了同一景象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。

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、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。

在凝视成像的过程中，景象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抽样，最后，利用探测器的抽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，那么常用MTF来对系统的性能进行评价。然而，采样系统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抽样，在这个过程中会产生由于探测器单元的有限尺寸所引起的模糊以及由抽样引入的频谱混淆。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4类。第一类为纯硬件法，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，所以从严格意义上讲难以提高分辨率。第四类方法即是微扫描方法，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现在可达 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，来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重要的现实意义。

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。基于高密度的 IRFPA 的制备技术还有待完善，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、目标识别等领域，要求系统有很较高的分辨率。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，提高光学系统分辨率、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。

微扫描技术是以抽样定理为理论基础的，该定理给出了一个重要的结论：一个连续的限带函数可以由其离散抽样序列代替，而且并不丢失信息。在实际情况下，图像的带宽并不满足带限及系统的 Nyquist 条件，采用过程会引起频谱混淆。为了减少频谱混淆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，减小频谱混淆的影响，下面就来详细的阐述微扫描的原理。

1）微扫描的工作原理

微扫描是一种减少频谱混淆的常用方法，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 $N\times N$ 帧欠抽样图像，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，从而达到最终实现提高分辨率的目的。

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 4 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 1/3，得到 9 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 4 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 的抽样栅格如图 5.15 所示，该采样栅格用一个矩形点阵来表示。采样间距取为 1mrad，黑点表示单个探测器单元，空间的空白部分表示非敏感区。

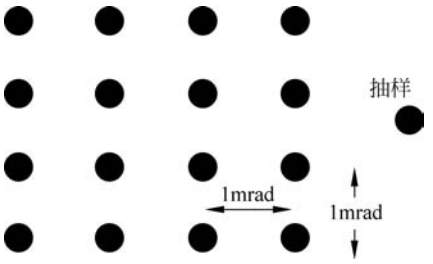


图 5.15　每帧场像的采样栅格

图 5.16 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，微扫描装置将抽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 抽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。图像被移动到抽样位置 3 时，进行第三帧场像的采集。这个过程重复到第四帧场像，并返回位置 1，开始下一帧图像的采集。如果景象是静态的，那么当所有的场像组合时，水平和垂直方向的有效抽样间距为 0.5mrad。这说明，使用微扫描方法可使抽样间距减小 1/2，则水平和垂直方向的抽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。

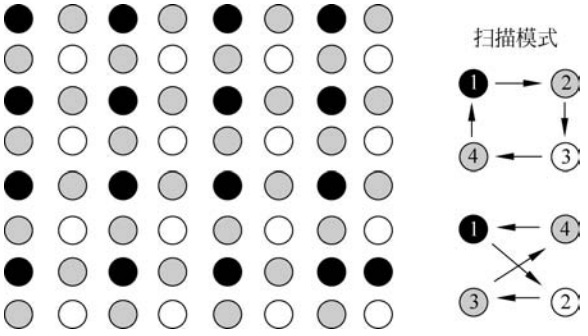


图 5.16　矩形双向扫描模式

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 4 个相邻探测器单元所确定的矩形的对角线的间距的一半，如图 5.17 所示。

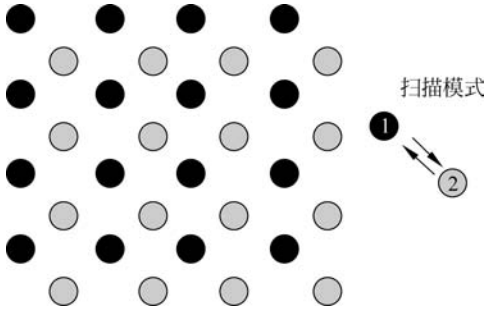


图 5.17　对角线扫描模式

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。

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 1/120s 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 5.18 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，说明探测器的抽样间距越小，空间抽样率越高，对图像分辨率的提高越好。

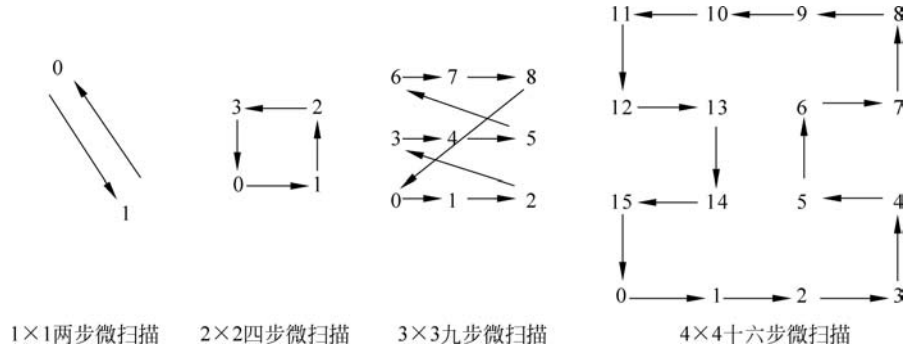


图 5.18　微扫描工作模式

3）微扫描装置

为了实现图像在阵列上的移动，要求系统内有移动机械装置，也就是微扫描装置。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激励器进行组合构成的，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，很难实现精确和快速的移动。采用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，摆动平面镜做的是快速移动，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，并且要求较高的电动机传动功率，总的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，扫描透镜产生的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 5.19 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（小于抽样间距）的平移，而且微扫描装置可以制成对几个轴进行扫描的形式。例如，图 5.20 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象成像在 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装置的驱动产生亚像素的位移，从而使图像在 FPA 上产生移动。

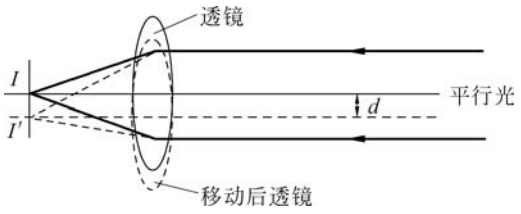


图 5.19　微扫描透镜移动示意图

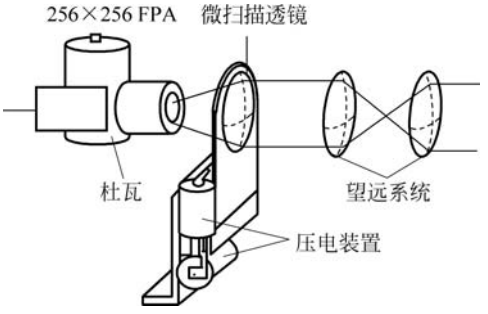


图 5.20　微扫描装置

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 $N\times N$ 幅欠抽样图像将其置于更精细的网格上，合成一幅 Nyquist 频率提高到 N 倍的微扫描图像。微扫描技术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。利用压电装置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、混叠更少的图像。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，则可以利用这些多幅图像重建高分辨率图像。

采用空域错位叠加的方法，已经很好地证明了微扫描在成像过程中的重要作用。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更好。

微扫描是一种在不增加探测器数目的情况下，提高光学系统分辨率、改善成像质量的有

效方法。对于非均匀微扫描来说，只要能够求出图像之间的移动量，就可以利用图像之间相互补充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接近的性能。然而目前微扫描技术主要受到以下的限制：

(1) 对于给定的帧频，探测器对图像进行抽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。需要明确的一点是，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，多留时间用于稳定微扫描镜。

(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与实时的数据图像处理达到一个折中状态。

(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。

微扫描技术是一种非常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、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，具有重要的理论研究价值和应用价值。

5.3.6 非制冷红外焦平面探测器

非制冷红外焦平面(阵列)探测器是热成像系统的核心部件。非制冷红外探测器利用红外辐射的热效应，由红外吸收材料将红外辐射能转换成热能，引起敏感元件温度上升。敏感元件的某个物理参数随之发生变化，再通过所设计的某种转换机制转换为电信号或可见光信号，以实现对物体的探测。非制冷红外焦平面探测器从设计到制造一般可分成非制冷器件、ROIC、真空封装三大技术模块。

1. 非制冷红外焦平面探测器分类

非制冷红外焦平面探测器分类如图 5.21 所示。这里主要介绍热释电型探测器、热电堆探测器、二极管状探测器、热敏电阻型探测器。

1) 热释电型探测器

红外辐射使材料温度改变，引起材料的自发极化强度变化，在垂直于自发极化方向的两个晶面出现感应电荷。通过测量感应电荷量或电压的大小来探测辐射的强弱。热释电红外探测器(见图 5.22)与其他探测器不同，它只有在温度升降的过程中才有信号输出，所以利用热释电型探测器时红外辐射必须经过调制。探测材料有硫酸三甘肽、钽酸锂、钽铌酸钾、钛(铁电)酸铅、钛酸锶铅、钽钪酸铅、钛酸钡等。

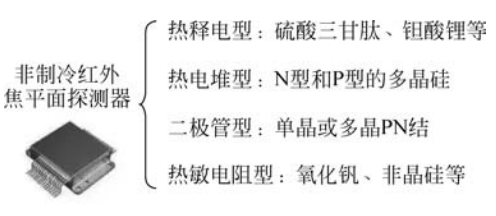


图 5.21 非制冷红外焦平面探测器分类

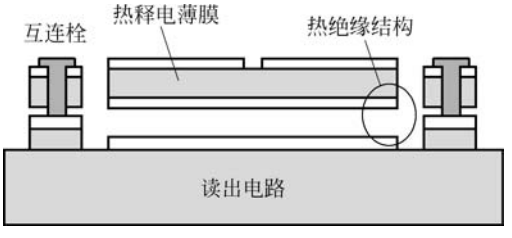


图 5.22 热释电红外探测器示意图

2）热电堆型探测器

由逸出功率不同的两种导体材料所组成的闭合回路，当两接触点处的温度不同时，由于温度梯度使得材料内部的载流子向温度低的一端移动，在温度低的一端形成电荷积累，回路中就会产生热电势[塞贝克效应(Seebeck)]，这种结构称为热电偶。一系列的热电偶串联称为热电堆。因而，可以通过测量热电堆两端的电压变化，探测红外辐射的强弱，如图 5.23 所示。

3）二极管状探测器

二极管状探测器利用半导体 PN 结具有良好的温度特性，与其他类型的非制冷红外探测器不同，这种红外探测器的温度探测单元为单晶或多晶 PN 结，与 CMOS 工艺完全兼容，易于单片集成，非常适合大批量生产，如图 5.24 所示。

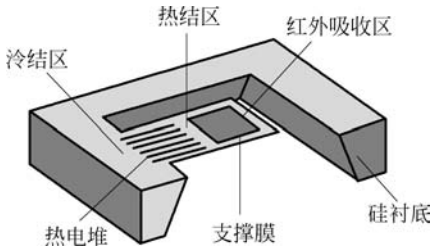


图 5.23　微机械热电堆红外探测器示意图

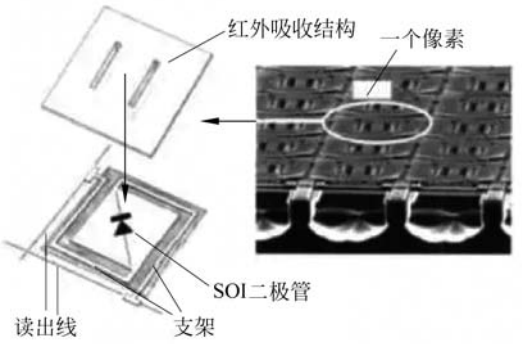


图 5.24　二极管状红外探测器示意图

4）热敏电阻型探测器

热敏电阻型(微测辐射热计)探测器利用热敏电阻的阻值随温度变化来探测辐射的强弱。一般探测器采用悬臂梁结构，光敏单元吸收红外热辐射，由 ROIC 测量热敏材料电阻变化而引起的电流变化，通过 ROIC 对电信号采集分析并读出。探测器一般采用真空封装以保证绝热性好。探测材料有氧化钒、非晶硅、钛、钇钡铜氧等。

单个微测辐射热计在硅衬底上通过 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System，微机电系统)技术生长出与桥面结构非常相似的像元，也称为微桥。桥面通常由多层材料组成，包括用于吸收红外辐射能量的吸收层，和将温度变化转换成电压(或电流)变化的热敏层，桥臂和桥墩起到支撑桥面，并实现电连接的作用。微测辐射热计的工作原理是：来自目标的热辐射通过红外光学系统聚焦到探测器焦平面阵列上，各个微桥的红外吸收层吸收红外能量后温度发生变化，不同微桥接收到不同能量的热辐射，其自身的温度变化也不同，从而引起各微桥的热敏层电阻值发生相应的改变，这种变化经由探测器内部的读出电路转换成电信号输出，经过探测器外部的信号采集和数据处理电路最终得到反映目标温度分布情况的可视化电子图像。

为了获得更好的性能，需要在微测辐射热计的结构设计上做精心的考虑与参数折中。主要的设计参数及要求包括：微测辐射热计与其周围环境之间的热导要尽量小；对红外辐射的有效吸收区域面积尽量大以获得较高的红外辐射吸收率；选用的热敏材料需要具有较高的电阻温度系数、尽量低的 $1/f$ 噪声和尽量小的热时间常数。

2. 非制冷红外探测器的组成及关键技术

非制冷红外探测器由红外窗口、非制冷器件、ROIC、吸气剂、TEC(Thermo Electric Cooler,热电温控器)、真空封装管壳等组成。关键技术主要有材料制备技术、MEMS 加工技术、ROIC 技术、低成本真空封装技术等,这里主要介绍 ROIC 技术、低成本真空封装技术。

1) ROIC 技术

照射到焦平面上的红外辐射所产生的信号电流非常小,一般为纳安甚至皮安级,这种小信号很容易受到其他噪声的干扰,因此 ROIC 的电学噪声要控制得尽量小,以免对探测器的灵敏度指标造成不必要的影响。

ROIC 的传统功能是实现信号的转换读出,近年来也逐渐加入了信号补偿的功能。ROIC 对微弱的红外辐射信号产生的电信号进行提取、积分、放大和模数转换。甚至完成片上非均匀性校正、片上数模转换功能。ROIC 有混合电路系统模拟部分(单元偏置电路、积分电路、采样/保持电路等)和数字部分(中央时序控制、行选控制、列选控制等)。

探测器制造工艺存在的偏差会导致探测器的输出信号存在非均匀性,近年来一些降低读出信号非均匀性的设计方法逐渐在 ROIC 上得到实现。例如,列条纹非均匀性就是一种与 ROIC 密切相关的形态,这是由于 ROIC 中有一些部件是焦平面阵列中每一列共用的,如积分器。这种电路结构会给同一列的输出信号引入一些共性特征,不同列之间的特征差异就表现为列条纹。针对列条纹的产生机理,可以通过改进 ROIC 设计来有效地抑制甚至基本消除列条纹,提高列与列之间的均匀性。

早期的非制冷红外焦平面探测器必须使用 TEC 来保持焦平面阵列的温度稳定,这是因为不同像元之间由于制造工艺的偏差会带来阻值的差异,最终表现为阵列的不均匀性:即使所有像元接受同样的黑体辐射,它们各自输出的电压信号幅值也是不同的;即使所有像元面对同样的黑体辐射变化,它们各自所输出的电压信号的变化量也是不同的。上述这种由于像元之间差异所导致的阵列不均匀性,还会随着焦平面温度的变化而改变,使得探测器输出信号呈现出复杂的变化,为后续信号处理工作带来困难。近年来,随着 ROIC 设计水平的提高,在实现传统 ROIC 的行选列选、积分器、信号驱动等基础功能之外,一些抑制像元输出信号随温度漂移的补偿电路也逐渐用于 ROIC 设计,从而可以实现无 TEC 应用,使得非制冷红外焦平面探测器在功耗、体积、成本等方面更具优势。

2) 低成本真空封装技术

为了保证探测器光敏单元在接收微弱的辐射后,其接收到热能不与其他介质发生热交换,需要把探测器芯片封装在真空中,一般对真空度的要求是小于 0.01mbar(即 0.000 01atm)并保证良好的气密性。

封装体的具体要求是:优异且可靠的密闭性;具有高透过率的红外窗口;高成品率;低成本。目前的封装技术可分为芯片级、晶圆级、像元级等,其中芯片级封装技术按照封装外壳的不同又可分为金属管壳封装和陶瓷管壳封装。

金属管壳封装是最早开始采用的封装技术,该技术已非常成熟,由于采用了金属管壳、TEC 和吸气剂等成本较高的部件,导致金属管壳封装的成本一直居高不下,使其在低成本器件上的应用受到限制。金属管壳封装形式的探测器曾经占据了非制冷红外焦平面探测器

的大部分市场，无论国外还是国内的生产厂商都有大量的此类封装产品。图 5.25 为 2 种量产的金属管壳封装的探测器。随着更低成本的新封装技术的日渐成熟，金属管壳封装形式的探测器所占市场份额已经显著减少。

陶瓷管壳封装是近年来逐渐普及的红外探测器封装技术，可显著减小封装后探测器的体积和重量，且从原材料成本和制造成本上都比传统的金属管壳封装大为降低，适合大批量生产。陶瓷管壳封装技术的发展得益于无 TEC 技术的发展，省去 TEC 可以减小对封装管壳体积的要求并降低成本。图 5.26 为非制冷红外焦平面的陶瓷管壳封装示意图。

图 5.25　非制冷红外焦平面的金属管壳封装

晶圆级封装是近些年开始走向实用的一种新型红外探测器封装技术，需要制造与（微测辐射热计）晶圆相对应的另一片硅窗晶圆，硅窗晶圆通常采用单晶硅材料以获得更好的红外透射率，并在硅窗口两面都镀有防反增透膜。（微测辐射热计）晶圆与硅窗晶圆通过精密对位，红外探测器芯片与硅窗一一精确对准，在真空腔体内将两片晶圆通过焊料环焊接在一起，最后再裂片成为一个个真空密闭的晶圆级红外探测器。图 5.27 为一个晶圆级封装红外探测器的封装示意图。

图 5.26　非制冷红外焦平面的陶瓷管壳封装

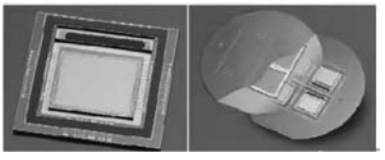


图 5.27　非制冷红外焦平面的晶圆级封装

与陶瓷管壳封装技术相比，晶圆级封装技术的集成度更高，工艺步骤也有所简化，更适合大批量和低成本生产。晶圆级封装技术的应用为红外热成像的大规模市场（如车载、监控、手持设备等）提供了具有足够性价比的探测器。

像元级封装技术是一种全新的封装技术，相当于在非制冷红外焦平面探测器的每个像元（微桥结构）之外再通过 MEMS 技术制造一个倒扣的微盖，将各个像元独立地密封起来。像元级封装技术使封装成为了 MEMS 工艺过程中的一个步骤，这极大地改变了封装技术形态，简化了非制冷红外焦平面探测器的制造过程，使封装成本降低到极致。随着像元级封装技术的成熟和实用化，非制冷红外焦平面探测器的成本还将大幅下降，更加贴近民用和消费级应用市场的需求。

3. 高性能、低成本非制冷红外探测器的实现途径

高性能的非制冷红外探测器的实现，关键在于探测器结构的设计以及 ROIC 的设计。低成本的关键因素取决于探测器结构的加工方式，以及探测器的封装方式。小型化、低功耗、低成本取决于像元尺寸不断减小，阵列规模持续增加。晶圆级封装及低成本封装工程化应用包含数字化、非均匀性校正的片上处理系统的 ROIC 设计。

（1）像元尺寸不断减小。更小的像元尺寸能够在焦平面单位面积上集成更多的像素，提高红外探测器的分辨率，同时也可以显著减小热成像设备的体积、重量、功耗和成本，因此

具有重要的意义。近年来，主流非制冷红外焦平面探测器的像元尺寸从最初的 50μm 左右，历经 45μm、35μm、25μm、20μm 等几种规格，已经逐渐进入以 17μm 为主流的时代，且更小像元尺寸如 15μm、12μm 也已进入实质性生产阶段。更小的像元意味着 MEMS 制造技术复杂程度的提高。

(2) 响应波段向中波以及太赫兹波段扩展。

(3) 面阵规模不断增大。1024×768 像素及更大面阵规模的探测器也已开始研制及试生产。

(4) 性能不断提高。探测器制造厂商重点研究如何在像元尺寸缩小的同时还能保持甚至提高性能，NETD 已可小于 35mK，响应时间小于 5ms。

(5) 金属管壳封装探测器因其高昂的封装成本会逐渐退出市场，陶瓷管壳封装探测器进入全面推广时期，晶圆级封装甚至像元级封装的探测器以其更低的成本优势可望获得快速增长。

(6) 包含数字积分、非均匀性校正和其他数字图像处理功能的片上处理技术也是“智能化”非制冷红外焦平面探测器的重要发展方向之一，在探测器 ROIC 中集成处理器和存储器将逐渐成为现实，可明显提高探测器组件的成像质量，提高可靠性，减小体积、重量和功耗。

5.3.7 短波红外成像系统

这里短波红外辐射一般是指波长为 1～3μm 的红外辐射，其主要来源有太阳辐射、地物反射、高温物体自身热辐射以及人工辐射光源等。在短波红外波段，地物的太阳反射光谱特征丰富，并且有 1.15～1.35μm、1.5～1.8μm、2.1～2.4μm 等大气透射窗口。短波红外成像是被动红外成像的一种形式。利用短波红外辐射的成像系统，即为短波红外成像系统。它与可见光成像系统、中长波红外成像系统相比较，既有其相同、类似之处，也有不同之处。从功能、用途来说，二者具有一定的互补性。

1. 系统组成与工作原理

短波红外成像系统与可见光成像系统、中长波红外成像系统，从硬件组成结构图来说，一般都是由光学系统、探测器、信号处理等多个部分组成，只是所采用的具体光学系统、具体组成器件、软件、设计细节等不同而已。图 5.28 为某短波红外成像系统组成结构图。

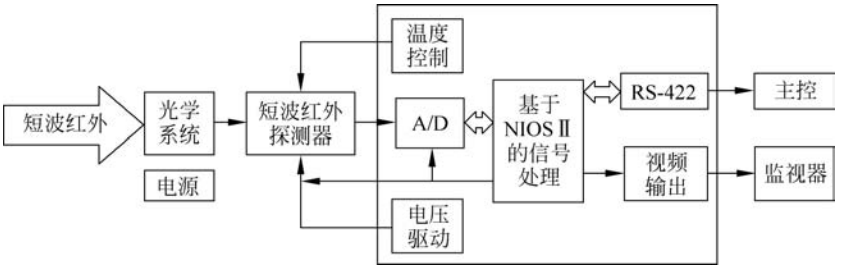


图 5.28 某短波红外成像系统组成结构图

光学系统接收短波红外能量，并将光束整形变换，聚焦在探测器的焦平面上。探测器完成短波红外的光电信号转换，以电压的方式输出目标景物的信息。A/D 转换电路完成探测器输出信号的模数转换。信号处理电路实现图像的预处理，包括短波非均匀性校正、盲元检

测与补偿等。显示模块完成短波红外图像的视频显示。温度控制电路稳定探测器的工作温度。串口通信模块实现与外界(如 PC)的通信。

该系统采用 640×512 InGaAs 短波红外探测器,响应波段为 0.9～1.7μm,内部集成 CMOS 读出电路,内置 TEC,量子效率和灵敏度较高。探测器驱动电路由驱动电压和驱动时序两部分构成,主要用于生成探测器驱动所需的多种不同精度以及噪声要求的偏置电压信号和时序信号。A/D 转换模块选择 ADI 公司的转换芯片 AD 9220,具有超低功耗、10MSPS(每秒采样百万次)采样速率等优点。

信号处理电路是短波红外成像系统的中枢,其主要作用是针对短波红外图像的特点进行实时信号处理,如图 5.29 所示。采用 Altera 公司基于 NIOS Ⅱ的单片 FPGA(Field Programmable Gate Array,现场可编程门阵列)完成信号处理。

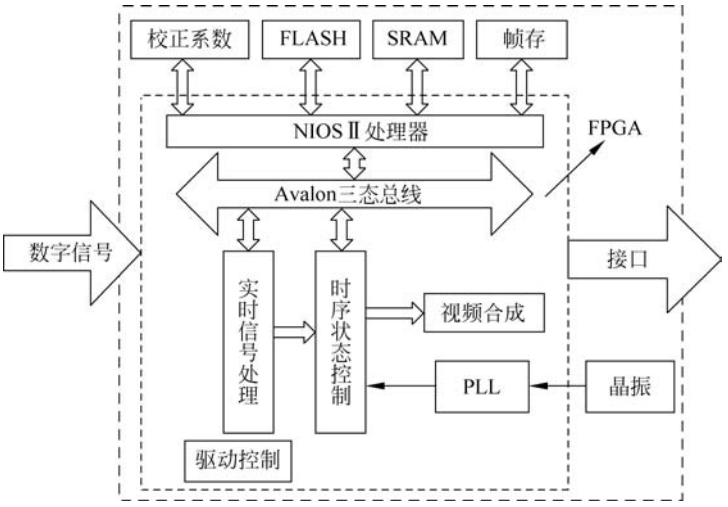


图 5.29　信号处理电路框图

FPGA 是系统的核心部件,由 NIOS Ⅱ处理器和外部逻辑模块组成。NIOS Ⅱ处理器是整个系统计算及控制的核心,完成非均匀性校正系数计算、灰度映射等需要复杂计算的功能,以及系统管理、串行通信等工作。外部逻辑模块实现实时信号处理、视频合成、时序管理等功能,并且为探测器、A/D 转换器、视频输出模块提供各种符合严格相位和逻辑关系的脉冲驱动信号。程序/数据存储器包括用于固化 FPGA 配置数据、NIOS Ⅱ软件和存储非均匀性校正系数的 Flash 器件、图像帧存、实时校正系数存储器和 NIOS Ⅱ的片外 SRAM。

实时信号处理主要实现短波红外图像非均匀性校正和盲元填充,原理如图 5.30 所示。

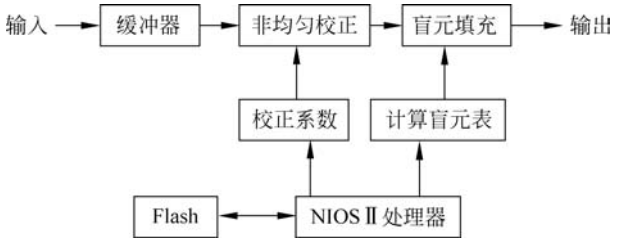


图 5.30　实时信号处理原理框图

焦平面阵列中各敏感像元自身基准温度的不一致将导致响应的非均匀性，为了提高成像质量，必须保证探测器工作温度的稳定，探测器内嵌 TEC 制冷器。

2. 成像特点

与中波红外和长波红外利用物体自身发射的热辐射成像不同，短波红外成像依靠接收物体反射环境中普遍存在的短波红外辐射进行成像。短波红外成像系统获取的主要是地物对太阳光的反射信号和高温物体的自身辐射，中波、长波红外成像系统接收到的是低温目标自身的热辐射。由于高温物体的辐射能量集中在短波红外波段，从而保证了短波红外成像系统接收到足够多的能量进而清晰成像。当短波红外成像系统的灵敏度足够高之后，系统能从暗电流和仪器背景辐射等背景信号中探测识别常温物体的热辐射，对常温等目标可以通过延长积分时间来增强热辐射能量，这时才能实现对目标的热成像。

因此，当不是利用物体在短波红外波段散发的辐射，而是利用反射光时，短波红外成像系统就不是热成像。白天具有很多短波红外光线，并且由于天空辉光现象，夜晚也具有很多短波红外光线。利用反射光及与可见光相近与其他红外波段较远的波长，短波红外成像系统能产生高分辨率的自然图像，图 5.31 为日出时海岸边可见光成像、长波红外(热成像)、短波红外成像对比图。

图 5.31　日出时海岸边可见光成像、长波红外、短波红外成像对比

短波红外范围敏感是由于铟镓砷(InGaAs)探测器的发展才于近些年成为现实的。短波红外传感器采用 InGaAs 探测器，可在室温下工作，无须制冷。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，可应用于众多领域。

绿色植物对短波红外的反射能力比对可见光要强。部分矿物在短波红外波段有强吸收峰。由于该特点，短波红外对于植被、岩石、云层探测方面有重要作用。短波红外探测在辨别军事伪装方面也有独特优势。由此，短波红外成像可以提供可见光、微光夜视、中波、长波红外成像所不能提供的信息。

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，适用性强，可用于全天候监控。

与中长波红外相比，短波红外的分辨率更高，其成像效果更接近于可见光图像。与可见光相比，它能够更好地穿透霾、雾、雨，可显示目标上的字母及涂料，也可消除某些类型的伪装。除此之外，短波红外还具有以下特点：

(1) 低照度成像(夜视能力)。大气层夜晚的辉光含有短波红外部分，短波红外可以在最低有星光的夜晚成像，具备一定的夜视能力。

(2) 识别目标。短波红外对水分非常敏感，缺少水分的物体呈现白色，富含水分的物体

呈现黑色，这一点，可以识别有无生命的物体。

(3) 探测隐蔽照明。由于短波红外对人眼、热像仪和夜视镜都不可见，可在保持隐蔽的同时，与主动照明一起使用，可用照射灯或人眼安全激光器照明。对人眼安全的 1550nm 的波长的照明是肉眼看不见的，却很容易由短波红外成像系统(红外相机)看到。

3. 光学系统设计考虑

制作短波红外镜头的光学材料与可见光的材料大都相同，如果简单地认为可以采用普通的可见光镜头与短波红外探测器进行匹配成像，这种观点不完全正确。

普通的可见光镜头的确可以透过短波红外的光谱，但由于波段的变化，光学材料的光学特性(色散)发生本质变化，适用于普通可见光镜头的玻璃组合难以实现对短波红外波段的色差校正，其在短波红外波段的成像质量变差，系统分辨率受到影响。另外，由于波段不同，可见光镜头在短波波段范围的透过率变差，杂散光问题可能会变得严重。

所以，应用在短波红外波段的镜头需要特殊的设计，完美地与短波红外探测器相匹配。在短波红外可用于校正色差的玻璃组合并不是很多，一些氟化物玻璃在该谱段具有较高的色散系数及相对较好的理化性能，因而是在该谱段消色差材料的首选。重火石类材料与氟化物玻璃组合有较好的消色差能力。

4. 与中长波红外系统的比较

如果将短波红外与长波红外融合，可以最大化地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，反映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有温度的目标，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，海岸线图像脱颖而出，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、无需低温制冷、尺寸小、功率低的特点。

短波红外与非制冷热成像系统相比，探测器温度控制电路组成是类似的，如图 5.32 所示。温控电路由温度传感器、温度传感器测量电路、比较电路、误差放大电路、PID 补偿网络、H 桥电路组成。

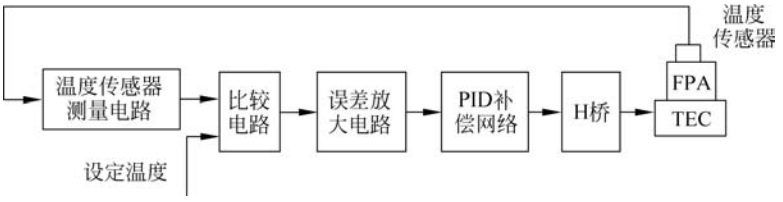


图 5.32　温度控制电路

值得一提的是，中、长波红外热像系统采用黑体提供标准辐射输入进行非均匀性校正，然而，短波红外成像系统则采用积分球提供标准照度输入进行校正。

5. 与激光主动成像系统的比较

这里所述的短波红外成像系统是被动成像的。被动成像系统最大的特点就是本身不带光源，依赖于环境或目标的发光，并最终成像。主动成像系统由一个人造光源（一般为激光器）和接收机（被动成像系统）组成，其接收机用于收集和探测目标景物直射或反射后的部分光辐射。

激光主动成像以近红外激光作为照明光源，对低照度的情况下，远距离目标进行探测成像。由于激光具有高强度、高准直性、单色性好、易于同步等优点，因而在成像系统中常常采用激光器作为照明光源。由于激光主动成像系统的照明激光主要在近红外波段（波长有0.808μm、0.830μm、0.850μm、0.915μm、0.940μm 和 0.980μm 等），这时激光主动成像系统也可以说是主动型短波红外成像系统。

由于波长 0.808μm 的半导体激光器工艺最成熟，使用也较广泛，加之普通 CCD/CMOS 图像传感器在近红外波段量子效率随着波长的延伸逐步降低，所以为了获得最好的照明效果，激光主动成像系统通常选用波长 0.808μm 的半导体激光器作为照明光源。

采用距离选通技术的激光主动成像原理如图 5.33 所示。

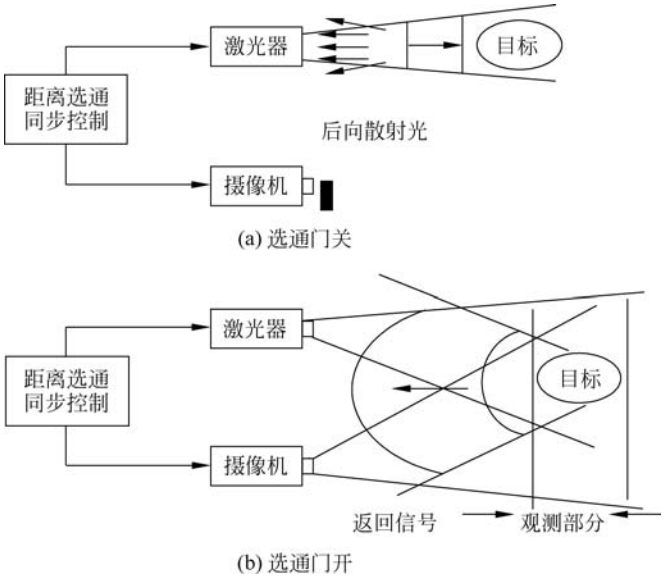


图 5.33 距离选通技术原理图

距离选通技术是利用脉冲激光器和选通 ICCD（或 EBCCD 等），以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射光，使由被观察目标反射回来的辐射脉冲刚好在 ICCD 选通工作的时间段内到达相机并成像。其中，距离选通同步控制是距离选通激光成像系统的核心，直接关系到能否得到目标的选通图像，主要是使激光器和 ICCD 同步，并且提供选通脉冲宽度和延迟时间选择。

激光距离选通可以分为 4 个阶段：

（1）激光器发射很强的短脉冲，激光脉冲向目标方向传输。这时接收器的选通门是关闭的。

（2）当激光脉冲处于往返途中时，会受到大气吸收、散射、后向散射和背景辐射等影响，

尤其是强烈的后向散射光往往会将有用的信号淹没，使接收器饱和而无法接收有用的光信号。这时摄像机的选通门是关闭的。这样就挡住了大气中悬浮微粒引起的后向散射光。

(3) 当反射光到达摄像机时，选通门开启，让来自目标的反射光进入摄像机。选通门开启持续时间与激光脉冲一致。

(4) 接收到从目标反射回来的激光脉冲信号后，再将选通门关闭，使背景辐射等其他干扰光不能进入接收器。

这样形成的目标图像主要与距离选通时间内的反射光有关。如果选通脉冲宽度和激光脉冲宽度都很窄，使得只能探测到目标附近的反射光，则能够大大提高回波信号的信噪比。

激光主动成像系统具有成像距离远、成像清晰、可以采用距离选通技术、抑制背景干扰、距离选通成像、识别目标及要害、测距、三维成像等特点，可作为被动成像的有益补充，在远距离暗(隐蔽)目标探测和水下探雷、水下成像等领域有着重要的应用。

5.3.8　红外光学系统抗干扰方法

在多数情况下，相对于可见光来说，红外目标为低对比度的弱目标；红外光学零件的剩余反射率也比可见光大得多，因此红外光学系统的自身抗干扰能力很低，红外系统对温度分辨率的要求越来越高，通常都要求对 0.1℃以下物体的细小温差进行分辨。要使红外系统在恶劣环境条件下始终获得稳定清晰的图像，除了电子系统尽可能降低噪声外，光学系统往往要采取多种措施来抑制和降低这些干扰。

红外探测器所接收到的辐射主要由 3 部分组成：

(1) 目标辐射；

(2) 直接到达探测器的内部辐射；

(3) 通过透镜表面的反射到达探测器的内部辐射，这其中包括镜筒的热辐射与探测器自身的冷辐射，即一次冷反射像(Narcissus)。对于具有内置扫描器的红外光学系统，这些内部辐射都将对图像造成致命的干扰，产生固有的图像缺陷。

下面介绍抗干扰的主要方法。

1. 100%冷光阑效率

红外系统的内部辐射往往要比目标辐射强得多，尤其在高温的环境下，如不考虑冷光阑效率，热图像随着温度的升高很快变白，甚至使探测器饱和，降低红外系统的动态使用范围，相关的实验证明：不考虑冷光阑效率，红外系统无法在环境温度条件高于 50℃的情况下正常工作。

2. 辅助光学系统

利用发射率很低的反射面，合理设计曲率，使冷反射散焦，同时使内部热辐射散射无法进入探测器。

3. 减小光学扫描噪声

在整个扫描视场中，由于系统的渐晕和光束移动而造成接收能量的变化，从而以交变噪声的形式出现，对图像产生干扰，所以具有内置扫描器的红外光学系统应是无渐晕的，同时尽可能减小光束的移动。

4. 光学零件的高效增透

相对目标的辐射而言，光学零件 1%的剩余反射对红外图像的干扰都是非常明显的。

好的镀膜技术与质量对于提高红外图像质量是重要的，它使红外光学系统的设计变得相对简单。

5. 改变透镜曲率

使任意光学表面的冷反射像相对于冷的探测器明显散焦，来减小冷像的强度，同时使内部热辐射尽可能少地进入探测器。这种办法往往是以牺牲光学系统的其他性能为代价的。

6. 滤除冷像

利用冷像和景物像的光谱特性的不同，合理使用滤光片，可以减小冷像的强度。

5.4 太赫兹成像系统

太赫兹(1THz=10^{12}Hz～1ps～300μm～33cm^{-1}～4.1meV～47.6K)辐射(波)是对一个特定波段(100GHz～10THz)的电磁辐射的统称，它处于红外和毫米波之间。在电磁波(电子学)研究领域，这一频段的电磁波又被称为毫米波或亚毫米波，遵循麦克斯韦方程，应用电路、天线、波导等元器件；而在光学研究领域，它也被称为远红外光(射线)，遵循薛定谔方程，应用透镜、反射镜、光纤等元器件。它具备独特的辐射特性。值得一提的是，THz 波段在有些场合特指 0.3～3THz，在另一些场合被赋予一种更广义的范围，其频率范围高达 100THz，这包含整个中、远红外波段。自然界中拥有大量的太赫兹辐射源，绝大多数物体的热辐射都在 THz 波段。但由于缺乏 THz 波段高效率的辐射源和灵敏的探测器，直到 20 世纪 90 年代才开始深入研究。

THz 成像是 THz 技术的一个重要应用方向。其成像技术被作为一种新型的成像方式正随着材料科学、反隐身、高技术武器攻防、信息对抗、自动导航、目标搜索及跟踪等技术的快速发展而日益被重视，已成为世界研究的热点。针对设计清晰、实时、高灵敏度、小型化及低成本 THz 成像系统还比较困难的问题，就其在成像方面的特点、工作原理、组成及关键技术(包括 THz 光学系统、探测器及信号处理)进行研讨，并分析比较电磁波段中 γ 射线、X 射线、紫外、可见光、微光、红外、THz 及毫米波各成像系统的优缺点和应用，以及 THz 成像系统的典型应用。也就是说，从设计 THz 成像系统的角度出发，对 THz 成像的独特性、关键技术、现状、应用及其成像技术的比较研究显得尤为重要。

5.4.1 太赫兹辐射特性

与短波长的电磁辐射相比，太赫兹辐射具有以下特点：

(1) 透视性。太赫兹辐射对于很多介电材料和非极性的液体有良好的穿透性。因此太赫兹辐射可以对不透明物体进行透视成像。太赫兹辐射的一个很有力的应用前景就是作为 X 射线和超声波成像等技术的补充，用于安全检查和无损检测。太赫兹辐射不但对固体材料具有良好的透视性，而且由于它的波长远大于空气中悬浮的灰尘或烟尘的尺度(从亚微米到几十微米)，这些悬浮颗粒对太赫兹波的散射要远小于对光频和红外波段电磁辐射的影响。太赫兹波在 30m 长的氯化锌烟尘环境中传播的实验表明，即使烟尘的浓度使可见度为零，烟尘对太赫兹波的衰减仍然很小。因此太赫兹辐射是浓烟(比如火灾)或风尘环境(比如沙漠)中成像的理想光源。

(2) 安全性。太赫兹辐射的另一个显著特点是它的安全性。相比于 X 射线具有千电子

伏的光子能量，太赫兹辐射的光子能量只有毫电子伏的数量级，因此它不会引起有害的电离反应。另外，由于水对太赫兹辐射有强烈的吸收，太赫兹辐射不能穿透人体的皮肤，因此即使强烈的太赫兹辐射，对人体的影响也只能皮肤表层，而不像微波那样穿透到人体的内部。

(3) 光谱分辨本领。大量的分子，尤其是有机分子，其转动和振动的跃迁，在这一频段表现出强烈的吸收和散射特性。太赫兹波的光谱分辨特性使得太赫兹探测技术，特别是太赫兹光谱成像技术，不但能够辨别物体的形貌，而且能够鉴别物体的组成成分。

太赫兹辐射与长波长的电磁辐射相比，也有其特点：

(1) 与微波相比，太赫兹辐射的频率更高，因此作为通信载体时，单位时间内可以承载更多的信息，在中短距离高容量无线通信中有应用潜力。

(2) 由于太赫兹辐射的波长更短，其发射方向性要好于微波。

(3) 在成像应用中，它的短波长使之具有更高的空间分辨率，或者在保持同等空间分辨率时具有更大的景深。

但是，太赫兹辐射应用也有其局限性：

(1) 太赫兹辐射在实用方面还有很大的潜力，尚处于发展中的领域。

(2) 太赫兹辐射无法穿透导电的物体，也就无法对金属等材料进行透视研究。

(3) 强极性液体(如水等)对太赫兹辐射有非常强的吸收，液态水在 1THz 的吸收系数是 $230cm^{-1}$(但水汽对太赫兹辐射的吸收表现出显著的光谱特性，比如在 0.4～1THz 之间有 0.5THz、0.65THz、0.87THz 等窗口)。

(4) 太赫兹辐射在空气中的远距离传输受到气体吸收的限制，有显著的衰减。

5.4.2　太赫兹成像系统的组成、工作原理、分类及技术特点

THz 成像系统的组成、工作原理、分类及技术特点如下。

1. THz 成像系统的组成

THz 成像系统大致包括太赫兹辐射源、THz 光学系统(包括频带选通、准直及聚焦)、THz 探测器、交直流信号转换、信号放大滤波处理、采集存储和信号调制处理、显示器。其组成框图如图 5.34 所示。系统的整个成像过程若采取扫描的方式，则当扫描完成后就会呈现出整个目标图像。随着焦平面成像技术的发展，光导天线形成探测阵列已被应用到 THz 成像系统中来提高系统吸收效率及灵敏度。

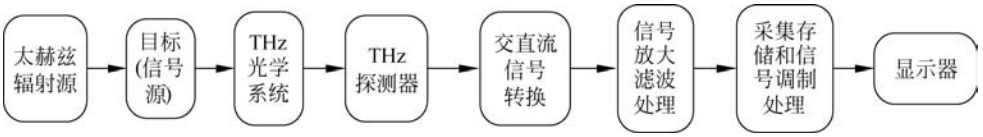


图 5.34　THz 成像系统组成框图

2. THz 成像的工作原理

利用太赫兹辐射源所产生的已知 THz 波作为成像射线，经目标透射或反射后记录了其谱信息(包括复介电常数强度、振幅及相位的空间分布信息)的 THz 波，或目标自身辐射已载有目标信息的 THz 波，经过 THz 光学系统后，通过(斩波器)调制，再聚焦至 THz 探测器引发其特性变化，根据不同的变化转换为相应电信号，随后经适当的信号分析处理，最终得

到目标的二维或三维图像。

3. THz 成像的分类

从不同角度，THz 成像有多种分类。根据相干与否，可分为相干成像和非相干成像。根据成像手段的不同，可分为主动成像和被动成像，也分别称为有源成像和无源成像。根据对样品的成像方式，主动（有源）成像又分为透射成像和反射成像。另外，THz 主动成像还可分为扫描成像、近场成像及层析成像等。

THz 时域光谱成像是一种典型的相干探测成像；THz 近场成像可突破波长对分辨率的限制，提高 THz 成像的空间分辨率；THz 层析成像可研究物体内部结构，进而对其进行二维和三维成像。提高空间、谱和时间分辨率是 THz 成像研究的主要方向之一。

THz 成像主要有：基于 THz QCL（Quantum Cascade Laser，量子级联激光器）的二维扫描成像、采用 THz QCL 进行三维重构成像、基于 THz QCL 的实时成像、基于 THz QCL 的相干合成孔径雷达成像、基于 THz QCL 的主动扫描成像、基于 THz QWP（Quantum-Well Photodetector、量子阱探测器）的被动成像、基于 THz QWP 的透射扫描成像、基于 THz QCL 和 THz QWP 的计算机断层成像（Computed Tomography，CT）、衍射层析成像、菲涅尔透镜三维成像、飞行时间成像、光谱成像、透视成像、合成孔径成像和干涉成像等。

4. THz 成像的技术特点

THz 成像有如下技术特点：

（1）THz 光子能量只有毫电子伏数量级，不会对物质产生破坏作用，适合用于对生物组织进行活体成像检查，并具有对黑体辐射或热背景不敏感的优点。

（2）THz 脉冲源只包含若干个周期的电磁振荡，偶极子的转动、振动跃迁及一些晶体材料的声子振动能级都落在该范围。对研究药物化学元素组成、指纹识别、检测电子元器件及鉴定炸药属性等具有特殊意义。

（3）与其他光源相比，太赫兹辐射可测量出材料的空间密度及折射率空间分布，获得材料的更多信息。结合断层扫描技术，可获得样品的三维信息。

（4）THz 脉冲的带宽很宽并具有相干性，可在亚皮秒分辨率的基础上直接测量电磁场，这为研究散射机理提供了一种有价值的新方法，利用此特性可进行军事目标识别及生物成像等。

（5）THz 成像可探测比可见和中长波红外更远的信息。极大信号带宽和极窄天线波束因 THz 频率很高而易于实现。在 THz 雷达成像中，信号带宽决定距离差，其纵向分辨率有：$\Delta = c/2B$，其中 c 为光速，B 为信号带宽。因此，通过测量脉冲相干 THz 信号时域波谱，可获得更小目标的精确定位，且保密性更强。

5.4.3 太赫兹成像系统关键技术

THz 成像系统关键技术主要包括太赫兹辐射（光）源、THz 光学系统、THz 探测器、信号处理等。

1. 太赫兹辐射源

太赫兹辐射源对成像性能有重要影响，可分为有自然辐射源和人工辐射源。THz 人工辐射源通常包括自由电子激光器、工作于 THz 频段的气体激光器、真空电子学 THz 源、超快激光泵浦光电导 THz 源、THz QCL 以及光电子学太赫兹辐射源和其他半导体电子学

THz 源、反波管等。在 THz 成像系统设计时，应充分考虑辐射源特性（波段、频谱强度分布等）。

2. THz 光学系统

THz 光学系统应根据应用场合来设计。THz 光学系统设计应满足如下要求：

（1）小尺寸，便于整机安装调试；

（2）尽可能大的相对孔径；

（3）满足要求的视场角；

（4）在所选波段内有最小辐射能损失；

（5）适应不同环境，并具有可靠稳定的光学性能等。

在二维成像光学系统中，一般应用光电晶体进行探测，光学系统物距总是远远大于透镜焦距。其成像分辨率为

$$\Delta = 1.22\lambda D_t f/(D_s D) \tag{5.24}$$

式中，λ 是成像载波波长；D_t 是目标尺寸；f 是透镜焦距；D_s 是探测晶体尺寸；D 为透镜直径。由此，一旦探测晶体尺寸、透镜直径及探测波长确定，则可设计如图 5.35 所示的谐衍/折射变焦光学系统来得到一定分辨率的图像。

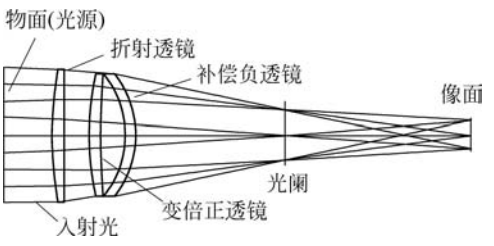
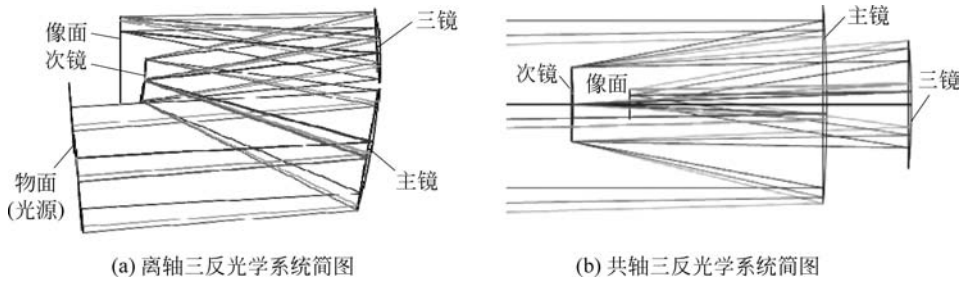


图 5.35　谐衍/折射变焦光学系统简图

反射式 THz 光学系统具有易获得大口径反射材料，无色差且能较好地校正球差和彗差，光能损失小，工作波段宽，系统总长度短等优点；但其 F 数较大，中心挡光，光机结构复杂性增大，加工装调困难，杂散光不易控制，制作成本高，难以满足大视场、大孔径成像要求。如图 5.36 所示，图 5.36(a)为离轴三反光学系统简图，图 5.36(b)为共轴三反光学系统简图。



(a) 离轴三反光学系统简图　　(b) 共轴三反光学系统简图

图 5.36　反射式光学系统简图

可利用 ZEMAX 光学成像设计软件，通过编写简单的 ZPL 宏指令及光阑和视场离轴，实现初始结构计算，再经优化计算而设计出理想的光学系统。

3. THz 探测及其探测器

太赫兹辐射源的低功率输出和 THz 频率范围内较大的热辐射背景噪声等因素对 THz 探测器的探测灵敏度等性能提出了很高的要求。对于太赫兹辐射的探测主要采用傅里叶变换光谱探测法、时域光谱 THz 探测法、外差式探测法、THz 半导体量子阱探测器直接探测法、量子点单光子探测法和肖特基(Schottky)二极管探测法等，这些方法各有其特点。

近年来，THz 探测器发展较快。光电导探测器主要材料有光子晶体、可探测频率范围仅为 3～4THz 的半绝缘 GaAs(砷化镓)材料，若采用低温 GaAs 光导天线，则可以探测至 20THz。光电导天线、电光晶体还是脉冲太赫兹波收发器(既可作为发射器，也可作为探测器)。用一种强 THz 脉冲照射普通的半导体材料 GaAs 会导致载荷子密度提高 1000 倍，这一发现有望带来超高速晶体管。表 5.5 为几种超脉冲信号探测器的基本性能参数比较。

表 5.5 超脉冲信号探测器比较

探测器	工作温度	工作频段/THz	带宽/THz	噪声等效功率/$W \cdot Hz^{-1/2}$	响应速度	相干性
光电导天线	室温	0.1～20	约为 2	10^{-15}	约为 100fs	相干
电光晶体	室温	0.1～100	约为 10	10^{-15}	约为 10fs	
空气探测	室温	0.1～100	约为 8	—	约为 ps	

对外差式探测器的研究，已研制出截止频率达到 3.37THz 的 THz 肖特基二极管和应用于 THz 频段的石英电路。作为 THz 倍频器核心器件，实现了倍频器在 THz 频段的工作，在 170～220GHz 的倍频效率为 3.6%，220～325GHz 的倍频效率达到 1.0%，可实现宽频带倍频。在 THz 成像、通信和卫星遥感方面有着广阔的应用前景。表 5.6 为几种连续信号探测器中某些器件的基本性能参数对比，其中 SBD 为肖特基二极管、SIS 为超导体—绝缘体—超导体结混频探测器、HEB 为电子辐射热量计混合器。

表 5.6 连续信号探测器比较

探测方式	探测器	工作温度	本振功率	工作频率范围/THz	噪声等效功率/($W \cdot Hz^{-1/2}$)	响应速度
外差式探测器	SBD	低/室温	0.5mW，3～5mW	0.5～3.37	10^{-19}	约为 ps
	SIS	2～4K	1～10μW	0.1～2	10^{-21}～10^{-20}	约为 ps 级至 ns 级
	HEB	2～4K	1～250nW	1～5	10^{-21}	约为 ps 级至 ns 级
直接式探测器	测辐射热计	低温	约 10nW	全波段	10^{-12}	几十 ps
		低/室温	—		10^{-15}～10^{-12}	约为 ms
	Golay	室温	—	全波段	10^{-15}～10^{-12}	约为 100ms
	热释电	室温	—	全波段	约 10^{-9}	约为 100ms
	单光子	约 50mK	—	1.4～1.7	约 10^{-22}	约为 1ms

THz 成像系统中，探测器关系到随后成像质量。在太赫兹辐射源功率普遍较低的情况下，发展高灵敏度、高信噪比、宽动态范围的 THz 探测器特别重要。图 5.37 为 THz 探测器的分类及其应用。

THz 成像所采用的探测器主要包括焦热电探测器(pyro-electric detector)、热辐射计(bolometer)、热膨胀式探测器(golay)、肖特基二极管、THz QWP 和碲化锌(ZnTe)电光晶体等。

4. 信号处理

在 THz 成像系统中，信号处理决定着检测的灵敏度、噪声系数、抗干扰能力等关键指标，关系到最终成像质量。根据多级级联放大器总噪声系数公式：

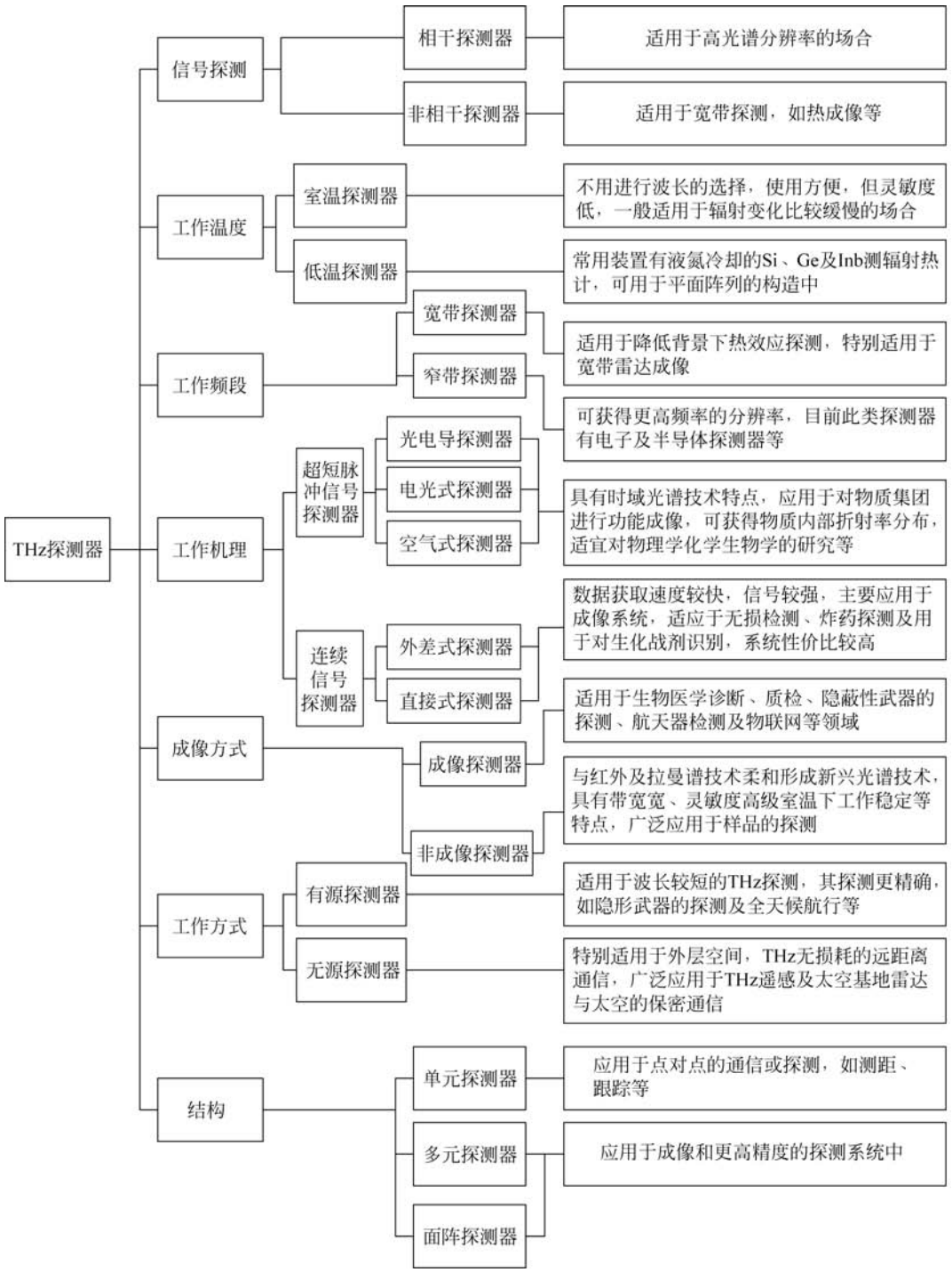


图 5.37　THz 探测器分类及应用

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2} + \cdots + \frac{F_M - 1}{K_1 K_2 \cdots K_{M-1}} \tag{5.25}$$

式中，F 为各级放大器噪声系数；K 为功率增益，下标代表放大器级数。可知高性能前置放大器设计尤为关键。

前置放大电路的设计要求：

(1) 高增益及低噪声，以保证足够大的信噪比；

(2) 足够的带宽，以免产生波形失真；

(3) 输出阻抗低；

(4) 负载能力强；

(5) 抗干扰能力强。

以下将恒压或恒流信号源热噪声(源电阻)来等效探测器和偏置电路的总噪声，综合考虑放大电路类型、器件选择及放大方式来设计前置放大电路，表 5.7 为设计前置放大电路的最佳组合方式。

表 5.7 设计前置放大电路的最佳组合方式

源等效阻抗	放大器件	放大类型	放大方式	优点
10Ω～1MΩ	晶体管	低阻型	电荷放大	工作稳定可靠
1kΩ～1GΩ	JFET	高阻型	电流放大	负载能力强，耦合电容小，采用热电探测器时可用此方法
＞1MΩ	VMOS 场效应管	高阻型	电流放大	
1kΩ～1MΩ	运算放大器	跨阻型	电压放大	信噪比及灵敏度高、频带较宽、直流精度很高

通常可以利用电子电路仿真设计软件(如 Multisim)对放大电路基本特性如输出增益、输出脉冲上升时间、噪声、输入输出阻抗和带宽等进行仿真测试。这种理论测试分析对实际前置放大器的设计有帮助与参考价值。

5.4.4 多种成像系统技术比较

按电磁波段划分成像系统类型，比较分析其优缺点及主要应用如表 5.8 所示，其中，各成像系统共同的主要性能参数有系统信噪比、传递函数、视场及动态范围。

5.4.5 太赫兹成像系统的典型应用

太赫兹辐射之所以引起人们的广泛关注，是因为它具有不同于微波、红外光以及 X 射线等电磁波的特点。其研究与应用涉及物理学、材料学、生命科学、天文学、信息技术和国防安全等许多领域。它在太赫兹波谱分析、物体成像、太赫兹环境与质量监测、太赫兹生物与医疗诊断、太赫兹射电天文探测、太赫兹通信(宽带移动通信、卫星通信)和军用雷达等方面具有广阔的应用前景。

相对于可见光和 X 射线，太赫兹成像具有非常强的互补性，特别适合于可见光不能透过，X 射线成像的对比度又不够的场合。太赫兹摄像机能在 10～20m 范围内将隐藏物呈现出来；超宽带太赫兹探测成像仪，可透视墙壁。利用太赫兹成像技术对实现地沟油进行直观检测及分析。另外，随着太赫兹技术的发展，制造高能量太赫兹射线将有望“剿灭”癌症。

表 5.8　多种成像系统技术比较

成像方式	波长/μm	应用类型	主要性能指标	成像系统优点	成像系统缺点	主要应用
γ射线	$<10^{-4}$	γ相机； γ望远镜； γ全息成像	位置、能量及空间分辨率；探测效率；系统灵敏度；背景触发率；几何面积；噪声阈值	(1) 具有一定的穿透力； (2) 对放射性物质成像距离远、灵敏度高； (3) 可达到观测小脏器的分辨率； (4) 使用方便等	(1) 边界产生压缩效应； (2) 光学系统材料较少； (3) 低能量下灵敏度不够高； (4) 辐射会造成人体伤害等	(1) 疾病诊断； (2) 原子、离子等结构研究； (3) 天文研究； (4) 核污染区分布及程度的判定； (5) 军控核查及反恐等
X射线	10^{-5}～0.01	X线透射机； X线摄影机； X线照相	辐射剂量；空间分辨率；噪声率；图像的灰度级；穿透力；图像评估	(1) 信息量大； (2) 背景杂波低； (3) 穿透能力强； (4) 影像清晰； (5) 拍摄条件宽容范围大； (6) 动态特性高等	(1) 图像时间分辨率低； (2) 对被测人体有辐射损害； (3) 空间分辨率受限； (4) 成本高等	(1) 疾病诊断； (2) 材料的无损检测及焊接； (3) 安检； (4) 对生物内部运动情况研究等
紫外成像	0.3～0.4	紫外照相； 紫外显微镜； 紫外望远镜； 紫外摄影	最小紫外光灵敏度；作用距离；聚焦距离；帧速；光谱分辨率	(1) 灵敏度高； (2) 抗干扰能力强； (3) 对环境要求低； (4) 操作简单； (5) 检测方法安全可靠且效率高等	(1) 穿透能力弱； (2) 紫外线辐射可直接造成某些检测物损伤； (3) 光学材料稀少且制备困难等	(1) 对敌对目标的跟踪及精确打击； (2) 电力放电检测； (3) 岩石分布探测； (4) 火焰燃烧控制； (5) 现场侦查取证； (6) 零件探伤； (7) 天文学研究等
可见光成像	0.4～0.76	显微成像； 照相机； 望远镜； 电视摄像机	作用距离；灵敏度；帧频；分辨率；带宽；最小可分辨对比度	(1) 操作极其简单； (2) 图像的细节(光谱信息)丰富； (3) 动态范围大； (4) 结果准确、直观、灵敏度高； (5) 安全可靠等	(1) 由环境引起低能见度下，成像效果受到极大限制； (2) 光照过强，图像对比度会下降等	(1) 生物组成及病变的研究； (2) 天象及天体研究； (3) 公共场所监视； (4) 环境监测； (5) 卫星侦查等

续表

成像方式	波长/μm	应用类型	主要性能指标	成像系统优点	成像系统缺点	主要应用
微光成像	0.5～0.9	微光直视； 微光电视； CCD微光摄像机	光谱响应范围；灵敏度；作用距离；亮度增益；分辨率；出瞳直径及距离；灰度等级	(1) 极其微弱照度下可清晰成像，像调制度高； (2) 自身隐蔽性好； (3) 性价比高； (4) 动态范围大； (5) 体积小、重量轻； (6) 操作方便等	(1) 图像层次不够分明； (2) 强光出现时，图像模糊； (3) 浓云和烟雾影响观察效果； (4) 电子倍增装置需冷却，其帧频有所限制等	(1) 夜间监视、警戒、指挥、制导； (2) 微光夜视眼镜、夜视头盔、夜瞄具及微光电视跟踪制导仪的辅助配件； (3) 侦查摄影及水下作业等
红外成像	0.76～14	红外显微镜； 红外热成像； 红外凝视成像	光谱频带；热灵敏度；空间分辨率；工作温度；噪声等效温差NETD；最小可分辨/探测温差；帧频/行频	(1) 抗干扰能力强； (2) 可夜间工作； (3) 视距远且识别伪装能力强； (4) 无损害、自动化程度高、有一定的伪装能力； (5) 对地扫描可快速、高效获取地面目标图像等	(1) 对冷目标成像质量较差； (2) 穿透力弱； (3) 对环境适用性不够； (4) 空间分辨率低，图像层次感不强； (5) 制造复杂； (6)成本较高等	(1) 深层组织成像； (2) 产品的检测、识别和定量分析； (3) 加工参数监控； (4) 进行战略预警、战术报警、侦查、瞄准、导航、制导、气象、搜救、森林防火等
太赫兹成像	$30\sim3\times10^3$	太赫兹显微镜； 太赫兹时域光谱成像； 太赫兹连续波成像	频谱范围；作用距离；功耗；空间分辨率；工作温度；像素；采集速率；响应度	(1) 抗干扰能力强； (2) 反隐身能力强； (3) 穿透深度大； (4) 成像速度快、对比度和均匀性好； (5) 对物质敏感度强，安全可靠； (6) 可全天候工作等	(1) 成像质量不够高； (2) 光谱不够宽； (3) 欠缺高效、实用的辐射源； (4) 探测器材料及工艺水平欠缺等	(1) 安检； (2) 反恐； (3) 疾病诊断； (4) 金属、地雷及隐身武器的探测； (5) 材料无损探伤； (6) 瓦斯含量预测； (7)环境监控等
毫米波	$10^3\sim10^4$	主动成像(合成孔毫米波雷达成像、三维全息成像)；被动成像系统	工作频率；作用距离；信号带宽；信号极化方式；焦距；角分辨率；物镜口径；噪声等效温差；帧频；系统灵敏度	(1) 成像层次感强； (2) 可对远距离小目标成像； (3) 具有一定的烟尘穿透力； (4) 受环境影响小； (5) 隐蔽性与抗干扰能力强； (6) 指向性好等	(1) 有绕射现象； (2) 成像帧速率和系统的温度灵敏度相制约； (3) 存在空变问题； (4) 分辨率及实时性还不够高； (5) 体积大等	(1) 医疗检查； (2) 本战斗机群的信息获取； (3) 引导飞机着陆； (4) 目标识别与跟踪； (5) 隐匿物检测； (6) 军事地形测绘； (7) 武器制导等

太赫兹成像的应用领域有：

(1) 物理化学研究，如对分子团簇等气相物质的光谱及动力学性能研究、对蛋白质二级和三级结构细节清晰显示、对分子构型动力学相干控制等。

(2) 生物学研究，如药材成分鉴别、对 DNA 及蛋白质研究。

(3) 国土安全，如对爆炸物、违禁品及武器等危险物品的远程监测等。

(4) 遥感，如对航天器着陆进行全天候成像、对恐怖袭击进行预警、气象分析等。

(5) 雷达，如对目标的测距、跟踪等。

以下着重研究分析太赫兹成像系统在医疗、安检及军事领域的应用。

1. 在医疗方面的应用

太赫兹成像系统在医疗方面的主要应用有：

(1) 癌症诊断，太赫兹医疗成像主要进行皮肤膜疾病的诊断，特别是应用于区别近皮肤表面的良性与恶性损伤。

(2) 损伤探测，对于外科手术前预估入侵瘤的大小和深度、精确测定边缘处组织、精确皮肤烧伤深度及龋齿检测等方面具有独特的作用。

(3) 制药研究，主要用于对毒品、假冒药品及药物污染程度的鉴定；药物保质期的确定等。

2. 在安检方面的应用

太赫兹成像系统在安检方面的主要应用有：

(1) 对地雷或简易爆炸物的探测及对航天器进行无损探伤。

(2) 在公共场所、警戒区及安检站可检测出隐藏在衣服下的武器、装饰品、塑料炸弹等危险物。

(3) 对煤矿中瓦斯含量进行探测分析及可对稀有矿物质进行搜寻。

(4) 将该技术与物联网技术有机结合，可用于火灾、地震、塌方等灾害现场人员的快速搜救。

(5) 随着片上集成太赫兹系统的发展，利用太赫兹透射性等独特优点将其人体成像，经组网后，对失踪者进行可视化跟踪或搜寻，用以解决人员失踪问题。

3. 在军事方面的应用

太赫兹成像系统在军事方面的主要应用有：

(1) 太赫兹单脉冲雷达可在标准大气环境及全天候条件下识别出距海平面 1km 远的隐蔽目标，在路、海、空、天、电磁五维战场中，均可对其目标物进行对象识别。

(2) 在单兵作战中通过无线组网实时监控周边灰尘或烟雾环境及在此恶劣环境下进行远距离的敌情勘查并指挥作战。

(3) 用于坦克及装甲车对敌军目标精确识别、跟踪及告警等指挥控制。

(4) 在作战期间，用来感测地雷、炸弹、毒气及生物战剂，并提醒战斗人员做进一步处理。

(5) 在近距离反恐中，可透过障碍物观察恐怖分子内部人员的分布及携带武器情况。

(6) 可对敌方隐形战斗机进行实时监测或精确打击。

(7) 用于对军事装备进行质量检查。

(8) 在空间军事侦察中，可建立空间在轨目标的准确编目并识别卫星的载荷。

(9) 在导弹防御方面,用于紧密跟踪战略或战术导弹的尾焰,并快速做出应敌策略,提高导弹的预警能力。特别地,在终端制导、侦查预警空天飞机与超音速飞行器等方面将应用广泛。

太赫兹成像技术已经成为γ射线、X射线、紫外、可见光、微光、红外及毫米波等成像技术的有力补充,在医学、安检及军事等方面发挥着其独特作用并具有广阔应用前景。随着国内外太赫兹探测器材料、数字读出电路、太赫兹焦平面、反褶积信号处理、压缩图像处理及片上集成太赫兹系统等技术的迅速发展,实现清晰、实时、高灵敏度、高度紧凑及低成本的太赫兹成像系统将是未来的发展方向。

5.5 红外传感器工程设计示例

红外传感器是红外系统的主要功能单元之一,主要使命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、红外信号预处理等工程设计内容进行研究是不可或缺的工作。

5.5.1 设计出发点及分析

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。

5.5.2 红外工作波段选取分析

3～5μm 和 8～12μm 波段的红外成像技术,一直是红外成像技术发展的重点。这两个波段哪个波段在远距离探测方面性能更优越,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 年代开始一直在讨论中,由此可见这个问题的重要性。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射出射度(radiant exitance)差异来实现的。这个辐射出射度差称为辐射对比度(radiant contrast),它不同于辐射温差,对于相同的温差,辐射对比度会随着波段的不同有所变化。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。

1. 光谱辐射出射度

由普朗克(Planck)辐射公式:

$$M(\lambda,T)=\frac{c_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1)} \tag{5.26}$$

可知黑体的光谱辐射出射度 $M(\lambda,T)$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 5.38 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，但辐射出射度 ΔM 却不相同，而且 ΔM 的极大值也不在峰值波长 λ_m 处。后面将详细说明辐射出射度 ΔM 与 λ 的关系。

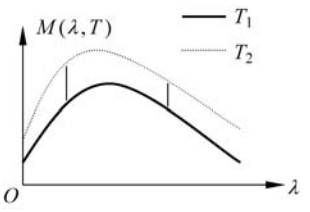


图 5.38　目标背景辐射曲线

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：

$$\frac{\Delta M(\lambda,T)}{\Delta T}=\frac{\partial M(\lambda,T)}{\partial T}=\frac{c_1c_2}{\lambda^6T^2}\frac{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}}{(\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1)^2} \tag{5.27}$$

也即

$$\Delta M(\lambda,T)=\frac{c_1c_2}{\lambda^6T^2}\frac{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}}{(\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1)^2}\Delta T \tag{5.28}$$

它表明辐射出射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 5.39 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？下面将详细说明。

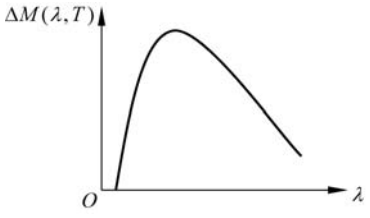


图 5.39　光谱辐射对比度曲线

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(5.28)进行微分，并令其结果等于零。由于只考查在某一特定温度下，ΔM 与 λ 的变化关系，故可在推导中将 T、ΔT 看作常量。即

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\lambda}(\Delta M)=0 \tag{5.29}$$

得到

$$\frac{c_1c_2\Delta T}{\lambda^7T^2}\frac{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}}{(\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1)^2}\left(\frac{2c_2}{\lambda T}\frac{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}}{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1}-\frac{c_2}{\lambda T}-6\right)=0 \tag{5.30}$$

上式中前两项均不可能等于零，只有

$$\frac{2c_2}{\lambda T}\frac{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}}{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1}-\frac{c_2}{\lambda T}-6=0 \tag{5.31}$$

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 $\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}/(\mathrm{e}^{c_2/\lambda T}-1)\approx1$，故式(5.31)可简化为

$$\frac{2c_2}{\lambda T}-\frac{c_2}{\lambda T}-6=0 \tag{5.32}$$

解此方程，得

$$\lambda T=2398\mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{K} \tag{5.33}$$

式中，c_2 为第二辐射常数。如果对式(5.31)采用计算机数值解法精确求解，可求得

$$\lambda T = 2410\mu\text{m} \cdot \text{K} \tag{5.34}$$

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(5.34)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 $\varepsilon = 0.99$，则目标到达成像系统的辐射温度传递为 $T' = \dfrac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln(\tau\varepsilon)} = 281K$。代入式(5.34)，得 $\lambda_M = 2410/T' = 8.57\mu\text{m}$。

因此，8～12μm 是比较理想的观察波段。如果需要观察高温目标，比如以 $Ma = 3$ 速度飞行的 x-2 型飞机，其蒙皮温度可达 605K，则 $\lambda_m = 2897/T = (2897/605)\mu\text{m} = 4.78\mu\text{m}$。其表面辐射系数 $\varepsilon = 0.9$，同样对 $\tau = 0.66$ 的大气传输路程为 $T' = \dfrac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln(\tau\varepsilon)} = 548\text{K}$。代入式(5.34)，得 $\lambda_M = 2410/T' = 4.39\mu\text{m}$。即选用 3～5μm 的工作波段是合适的。

需要说明的是，对于红外测温系统，一般高温测温仪(700℃以上)的工作波段主要为 0.76～3μm，中温测温仪(100℃～700℃以上)的工作波段主要为 3～5μm，低温测温仪(100℃以下)的工作波段主要为 5～14μm。

4. 两个红外波段的一些实际比较

较高温度的目标在 3～5μm 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 3～5μm 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，3～5μm 波段优于 8～12μm 波段。而 8～12μm 波段适合在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 3～5μm 波段更好；探测亚音速导弹，采用 8～12μm 波段更好。

对红外系统来说，在光学衍射限制和同一分辨角的情况下，3～5μm 波段的光学口径要比 8～12μm 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。两个波段相同规模的探测器、光学系统的成本价格比较，3～5μm 波段的价格低于 8～12μm 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，选择工作波段时，还应充分考虑大气传输窗口及探测对象、工作环境等因素，但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，3～5μm 波段和 8～12μm 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、迎头导弹)，其蒙皮辐射主要集中在 8～12μm 波段，这是因为 300K 时红外辐射的峰值波长约为 10μm。海上舰艇的红外辐射峰值波长也在 10μm 左右，加之 8～12μm 波段较宽，这是在采用单波段情况下，某型舰艇红外系统选取 8～12μm 作为工作波段的主要原因之一。从响应性能考虑，对于 8～12μm 波段宜选择 HgCdTe 材料。

5.5.3　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。

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。

2. 红外传感器性能

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。

5.5.4　红外传感器工作原理与组成

红外传感器工作原理与组成具体如下。

1. 红外传感器工作原理

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潜在目标处理单元进行下一步处理。

2. 红外传感器组成

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 5.40 所示。

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，经典的光学设计无法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

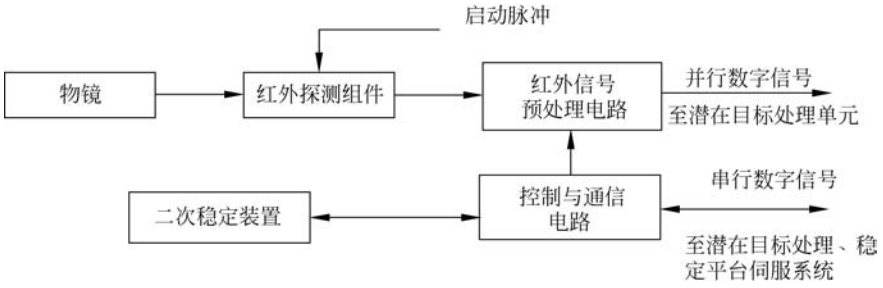


图 5.40 红外传感器组成框图

上采用多种材料来校正工作波段内的色差。

2) 红外探测组件的组成

该红外探测组件由以下部分组成：

(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 5.41 所示。

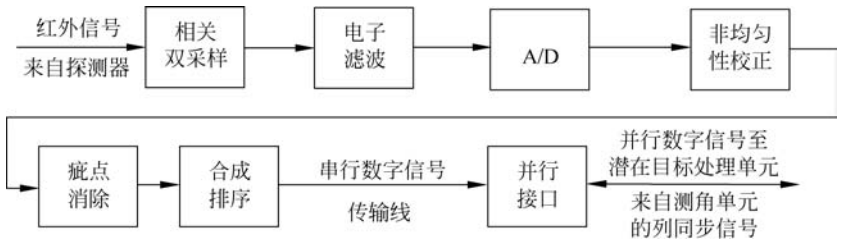


图 5.41 红外信号预处理电路组成框图

(1) 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 转换：对红外信号进行模拟量/数字量转换，量化等级为 12bit。

(4) 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≤0.5%。对于线性响应的探测器进行响应度和偏置点两点算法校正已足够了，对于非线性响应的探测器，需要采用多点分段线性逼近算法进行校正。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，通过对两点算法、多点分段线性逼近算法和基于场景的非均匀性补偿算法进行研究，工作情况良好，于是研制执行这 3 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：以并行方式向潜在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) 接收来自潜在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)，向潜在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、伺服电动机和驱动电路组成，其功能是对红外光轴进行二次精稳定。

5.5.5　红外探测器件及物镜光学参数选取

该红外探测器件及物镜光学参数具体选取如下。

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(7.7～10.3μm)变窄而产生的不足。经过对比分析，同时借鉴国外同类红外系统红外传感器的研制经验，选用某公司生产的 288×4 像元 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 5.42 所示。它是一种集成化的红外探测器——杜瓦瓶——微制冷器组件(IDDCA)。

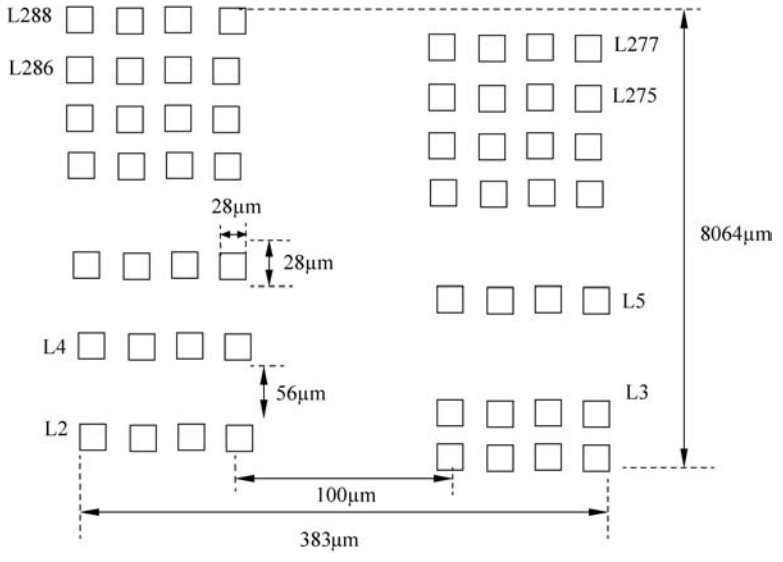


图 5.42　探测器组件的排列方式

ID TL005 型 288×4 像元长波红外探测器组件的主要性能指标如表 5.9 所示。

表 5.9 ID TL005 型 288×4 像元长波红外探测器组件的主要性能指标

波段/μm	7.7～10.3
单元尺寸($a\times b$)/(μm×μm)	25×28
像元数	288×4
平均峰值探测率 $\overline{D^*_{\lambda_p}}$/(cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1})	≥1.5×10^{11}
制冷方式	直线驱动斯特林闭路循环制冷
致冷器启动时间/min	≤10(@20℃)
工作温度	−54℃～+71℃
MTBF/h	>3000(按 MIL-STD-781-C 标准)
杜瓦瓶保真空时间/年	>10
重量/kg	<1.4

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讲没有什么区别。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、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

该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。

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

(2) 物镜焦距。

由图 5.42 可知,探测器的总线度 $L=8.064$mm,则 $f'=\dfrac{L/2}{\tan(\theta/2)}=109.96$mm,归整取 $f'=110$mm。

(3) 物镜口径。

物镜口径的大小对作用距离的影响很大,大口径的物镜能使作用距离更长。但从光学设计来讲,如果物镜的 $F_{数}$ 取得过小,那么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,综合各个因素来考虑,物镜系统选取 $F_{数}$ 为 1,于是 $D_0=f'/F_{数}=110$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 K 可达：$K \geqslant 95\%$(在 7.7～10.3μm 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 $\lambda=9\mu m$ 时，$d=2.44\lambda F_{数}=21.96\mu m$，弥散圆线直径 d 值小于像元尺寸 25μm，表明物镜参数的选取是正确的。

3. 物镜的温度补偿

由于大多数的红外材料(特别是锗)的$\frac{\partial n}{\partial T}$(折射率的热系数)很高，所以热效应是红外系统的固有特性。此外，大多数红外系统在使用环境中的极限工作温度低温小于－20℃，高温大于 40℃，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 δ 由下式求出：

$$\delta=\left(\alpha f+\alpha_m L-\frac{f}{n-1}\frac{\partial n}{\partial T}\right)\Delta T \tag{5.35}$$

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。既可采用主动的也可采用被动的绝热法。可用的方法如下：

(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。

由此可知，某型红外系统将在较宽的温度范围内(－30℃～＋65℃)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。

国内外普遍采用的物镜光学系统的温度补偿技术有 3 种方式，即机械温度补偿、电动温度补偿及自动温度补偿。鉴于红外传感器安装部位的特殊性以及对体积、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，来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值。

5.6　光电显示系统

显示(Display)是指对信息的表示，即 Information display。在信息工程学领域中，把显示技术限定在基于光电子手段产生的视觉效果上，即根据视觉可识别的亮度、颜色，将信息

内容以光电信号的形式传达给眼睛产生视觉效果。光电显示系统就是利用光电显示技术与器件制造的装置或设备，其中，显示器件（单元）至关重要。从显示原理的本质来看，显示器件利用了发光和电光效应两种物理现象。光电显示技术是将电子设备输出的电信号转换成视觉可见的图像、图形、数码以及字符等光信号的一门技术。它作为光电技术的重要组成部分，近年来发展迅速，应用广泛。

5.6.1 光电显示系统的基本组成及工作原理

光电显示系统的基本组成框图如图 5.43 所示。

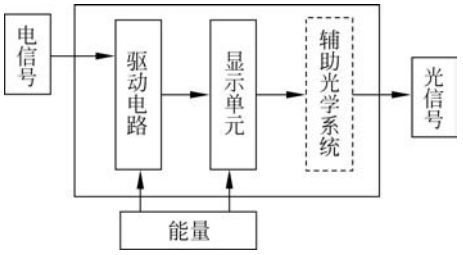


图 5.43 光电显示系统的基本组成框图

输入信号为具有一定格式协议的电信号，如电视信号。输入能量为电源，一般为 220V 市电。驱动电路将输入信号转化为与显示单元（器件）匹配、反映图像信息的驱动电信号。显示单元将图像电信号转化为光信号。输出可被人眼感知、反映原始场景的光信号。

值得一提的是，对于具体的光电显示系统，其组成结构形式往往是不同的，甚至差别较大。图 5.44 是基于扫描的激光投影显示系统的结构示意图，图 5.45 是基于面阵空间光调制器的激光投影成像系统的结构示意图。

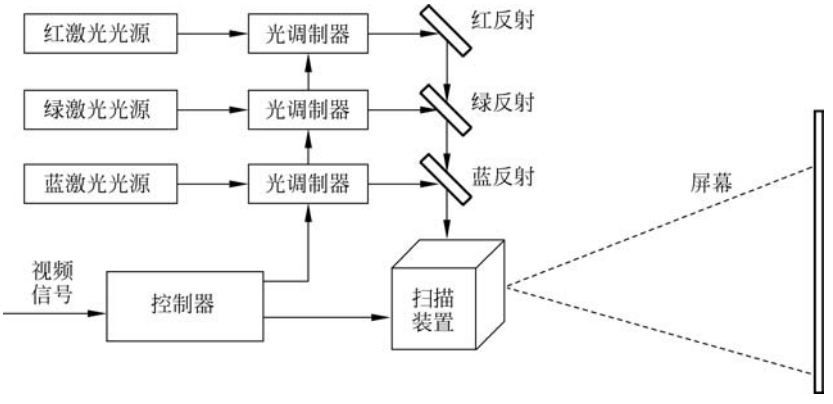


图 5.44 基于扫描的激光投影显示系统结构示意图

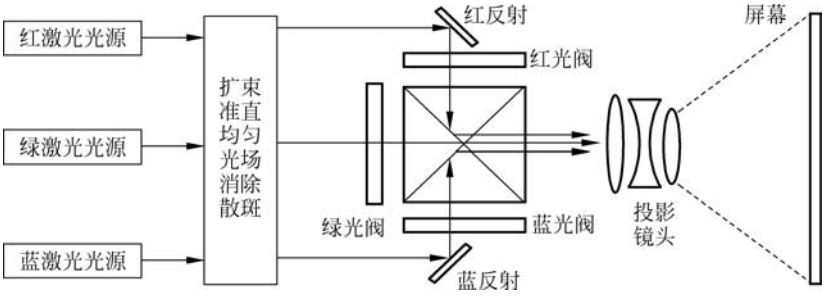


图 5.45 基于面阵空间光调制器的激光投影成像系统结构示意图

5.6.2　光电显示器件及系统分类

从显示器类别(显示原理)的角度来看,不同类别的显示器件构成不同类别的光电显示系统。具体分类有阴极射线管(CRT)、真空荧光管(VFD)、辉光放电管(GDD)、液晶显示器(LCD)、等离子体显示器(PDP)、LED、场致发射显示器(FED)、电致发光显示器(ELD)、电致变色显示器(ECD)、激光显示器(LPD)、电泳显示器(EPD)、铁电陶瓷显示器(Transparent Ceramics Display,PLZT)等。显示器件大致分类如图 5.46 所示。

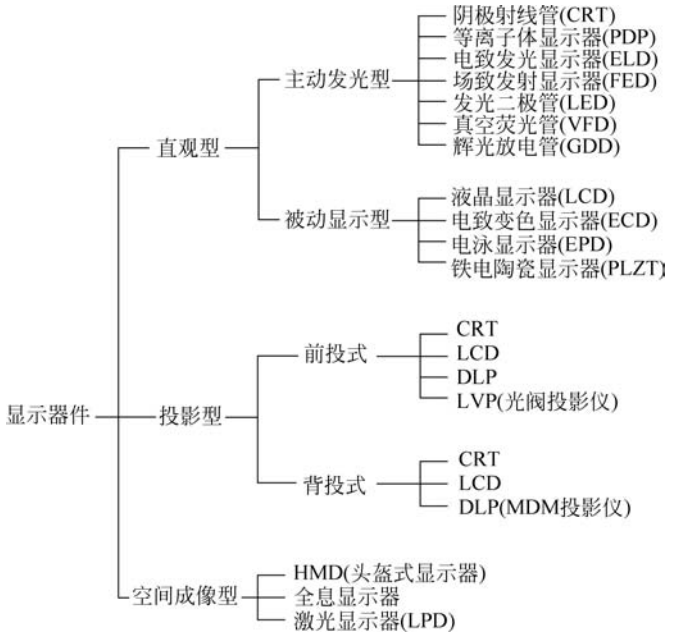


图 5.46　光电显示器件的种类

从其他角度来看,光电显示系统至少还可分类如下:

按显示屏幕大小,分为超大屏幕($>4m^2$)、大屏幕($1\sim4m^2$)、中屏幕($0.2\sim1m^2$)和小屏幕($<0.2m^2$)。

按色调显示功能,分为黑白二值色调显示、多值色调显示(三级以上灰度)和全色调显示。

按色彩显示功能,分为单色(monochrome)黑白或红黑显示、多色(multi color)显示(3 种以上)和全色显示。

按显示内容、形式,分为数码、字符、轨迹、图表、图形和图像显示。

按成像空间坐标,分为二维平面显示和三维立体显示。

按所用显示材料,分为固体(晶体和非晶体)、液体、气体、等离子体、液晶体显示等。

按使用便捷性,分为柔性显示器和非柔性显示器。

这些不同类别的光电显示系统,往往还可以细分成许多类别。如大屏幕图像显示系统,按显示技术又可分成如图 5.47 所示的种类。

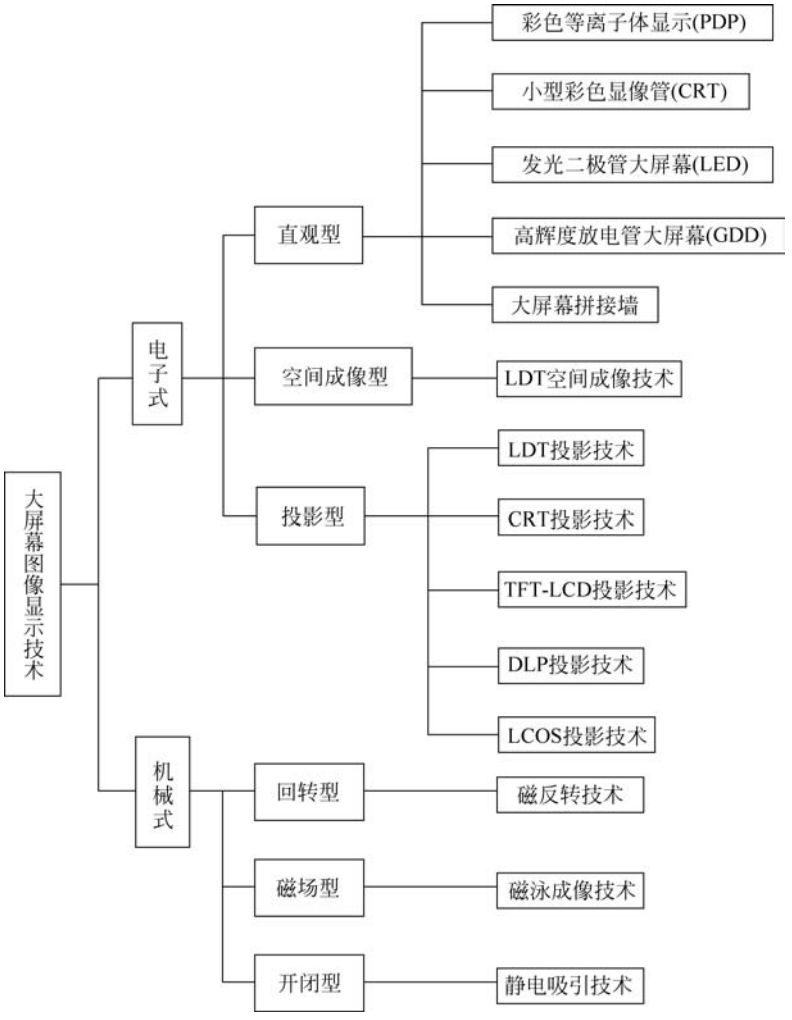


图 5.47 大屏幕图像显示技术

5.6.3 显示器件主要技术性能要求

显示器件主要技术性能要求体现在如下几个方面。

1. 像素

像素指构成图像的最小面积单位,具有一定的亮度和色彩属性。在显示器中,像素点的大小可依据该系统的观看条件(如观看距离、照明环境等)下,肉眼所能分辨的最小尺寸而确定。实际系统的具体举例如表 5.10 所示。

2. 亮度

显示器件的亮度指从给定方向上观察的任意表面的单位投射面积上的发光强度。亮度值用 cd/m^2 表示。一般显示器应有 $70cd/m^2$ 的亮度,具有这种亮度图像在普通室内照度下清晰可见。在室外观看要求亮度更高,可达 $300cd/m^2$ 以上。人眼可感觉的亮度范围为 $0.03\sim50\ 000cd/m^2$。

表 5.10　显示器制式与像素数、宽高比

器　　件	显示器制式	有效像素数			宽　高　比
		宽	高	总像素数	
彩色显像管	PAL	720	576	403 200	4∶3
	NTSC	720	490	352 800	4∶3
	HDTV	1920	1080	2 073 600	16∶9
彩色显示器	VGA	640	480	307 200	4∶3
	SVGA	800	600	480 000	4∶3
	XGA	1024	768	786 432	4∶3
	SXGA	1280	1024	1 310 720	5∶4
	UXGA	1600	1200	1 920 000	4∶3
	QXGA	2048	1536	3 145 728	4∶3
	QXGA	2560	2048	5 242 880	5∶4

3. 亮度均匀性

亮度均匀性反映的是显示器件在不同显示区域所产生的亮度的均匀性。通常也用它的反面概念——不均匀性来描述，或者用规定取样点的亮度相对于平均亮度的百分比来描述。CRT 显示器亮度均匀性能达到≥45%的水平，原因在于其边角的亮度值与中心区域的亮度值有一定差距，这也是由于 CRT 显示器件电子枪发射电子到显示屏上的不均匀性造成的。其他显示器件由于其显示屏由许多个显示单元组成，各个单元的亮度值相差不大，所以亮度均匀性都可以达到 80%以上。

4. 对比度

对比度指画面上最大亮度和最小亮度之比。该指标与环境光线有很大关系，另外测试信号一般采用棋盘格信号，并将亮度控制器调整到正常位置，对比度调整到最大位置，此时对比度为白色亮度和黑色亮度的比值。一般显示器应有 30∶1 的对比度。

5. 灰度

灰度指画面上亮度的等级差别。例如，一幅电视画面图像应有 8 级左右的灰度。人眼可分辨的最大灰度级大致为 100 级。

6. 清晰度

清晰度是指人眼能察觉到的图像细节清晰的程度，用光高度（帧高）范围内能分辨的等宽度黑白条纹（对比度为 100%）数目或电视扫描行数来表示。如果在垂直方向能分辨 250 对黑白条纹，就称垂直清晰度为 500 线（行）。根据数字电视有关标准来看，平板显示器（FPD）通过分量视频输入基本可以达到 720 线以上，而 CRT 显示器稍微低一些，达到 620 线以上，垂直清晰度与水平清晰度相同。其中，CRT 边角的清晰度要低于中心区域的清晰度。

7. 分辨率

分辨率是人眼观察图像清晰程度的标志，与清晰度定义近似，分辨率可以用图像小投影点的数量表示，如 SVGA 彩色显示器的分辨率是 800×600，就代表画面是由 800×600 个点所构成，组成方式为每条线上有 800 个投影点，共有 600 条线。分辨率有时也用光点直径来表示。用光栅高度除以扫描线数，即可算出一条亮线的宽度，此宽度即为荧光屏上光点直径的大小。在显示器件中，光点直径大约几微米到几千微米。一般对角线为 23～53cm 的电视显像管其光点直径约为 0.2～0.5mm。

8. 发光颜色

发光颜色(或显示颜色)可用发射光谱或显示光谱的峰值及带宽的方法,或用色度坐标的方法表示。显示器件的颜色显示能力,包括颜色的种类、层次和范围,是彩色显示器件的一个重要指标。真(全)色彩的色彩数目为 16 777 216 色,即如果红、绿、蓝各 256 级灰度,256×256×256=16 777 216≈16M。

9. 余辉时间

余辉时间指荧光粉的发光,从电子轰击停止时刻开始,到亮度减小到电子轰击时稳定亮度的 1/10 所经历的时间。余辉时间主要决定于荧光粉的种类,一般阴极射线荧光粉的余辉时间从几百纳秒到几十秒。

10. 解析度 DPI

解析度指图片 1 英寸长度上投影点的数量,分为水平解析度和垂直解析度。解析度越高显示出来的影像也就越清晰。

11. 收看距离

收看距离可以用绝对值表示,也可以用与画面高度 H 的比值来表示(即相对收看距离)。收看电视的适当距离约为距离屏幕 2m 较好,以利于通过眼球四周的肌肉收缩和松弛来调节眼睛的焦点。在现行彩色电视的隔行扫描的场合,约 $6H$～$8H$ 为宜。在办公自动化中,距离视频显示终端(VDT)的距离为 50cm 较为适宜。

12. 周围光线环境

周围光线环境主要指观看者所在的水平照度以及照明装置。在收看电视时,室内照明条件太亮或太暗都不好,四周光线的反射亮度应控制在 $2cd/m^2$ 以下,最好的值约为 $0.7cd/m^2$。在办公自动化中,对于计算机键盘和录入原稿等的水平面工作照度以 500lx 或稍高一些为好,约为家庭平均电视收看场合的周围水平面照度的 2 倍;显示器平面的垂直入射照度以 300lx 左右为好。在电影院参看电影时,屏幕亮度范围由 ISO-2910 国际标准规定为 25～$65cd/m^2$,中心亮度标准值为 $40cd/m^2$。在体育场、广告牌等室外大屏幕显示场合,光照环境在阳光直射下约为 10^4lx,因此需要 3000～$500cd/m^2$ 的亮度。

13. 图像的数据率

数据率指在一定时间内、一定速度下,显示系统能将多少单元的信息转换成图形或文字并显示出来。

14. 其他

其他指标如辐射,CRT 明显大于其他显示器件,其他显示器件之间差别不大。在显示相应时间方面,LCD 类的显示器件劣于其他器件。在显示屏的缺陷点方面,CRT 一般不会出现这样的问题,而其他显示器件虽然在出厂时该指标控制得较严,但在用户使用过程中有时会出现缺陷点。在可靠性方面(MTBF 值),基本上可以达到 15 000h,甚至更高。需要注意的是,投影系统中如果使用了耗损器件,那么在使用过程中需要定期更换这些部件。

5.7 计算成像系统

传统光电成像是在工业化时代发展起来的,随着工业化在深度和广度的发展,逐渐产生了一些瓶颈问题。真实世界的视觉光信息是复杂的高维度连续信号,而现有的数字成像方

式是低维耦合离散采集，在成像的各个维度——空间分辨率、时间分辨率、视角及深度、颜色（光谱）等均已达到瓶颈；基于能量探测的传统成像方法，丢失了光的波动方程中的相位以及矢量信息，造成实数模型描述的局限性，而实际的光学系统中则是对光波进行复数调制，即给光学系统的像差表示带来了一个相位项。这极大地限制了场景视觉信息的全面获取。更强计算能力、新材料、量子理论等途径的涌现，为光电成像带来广阔的新的发展空间。

计算成像将计算与成像相互融合相互促进的思维方式，早在成像技术的发展初期就已经萌芽。如果从系统工程的思想出发，将光电成像系统改写成复数型的非线性模型，不仅为光电成像带来了更多自由度的设计，而且可将大气和水等传输介质作为成像系统的一部分参与成像。尤其是将整个成像链路全局一体化优化设计，即光电系统总体优化设计，会推动现有的成像体制发展，取得理论和应用上的突破，产生新的成像技术——计算成像技术，从而形成相应的计算成像系统。

计算成像技术综合了信号处理、光学、视觉、电子学、图形学等多学科知识，可突破经典成像模型和硬件的局限，以更加全面、精确地捕捉真实世界的视觉信息。其基础是传统的光学数码成像。凡是在成像过程中引入计算的过程，都属于计算成像。计算成像实际上是将物理问题转换为数学问题，通过信号处理手段完成“数学”成像的方法，即针对解决某一问题，通过数学建模方法获得最优解。计算光学成像是传统技术上的融合创新，其利用数理模型描述或改变成像过程，可以突破传统光学技术的某些限制，按需设计、灵活多变，是一类有别于传统光学成像“所见即所得”的信息获取和处理方式的新体制成像方式，还没有完全统一、规范的定义。

5.7.1　传统成像和计算成像的原理及其比较

传统成像和计算成像如图 5.48 所示，其模式差异如图 5.49 所示。传统数码成像与计算成像的区别如图 5.50 所示。这些图简明、清晰地概括了传统成像和计算成像的原理与技术基础。

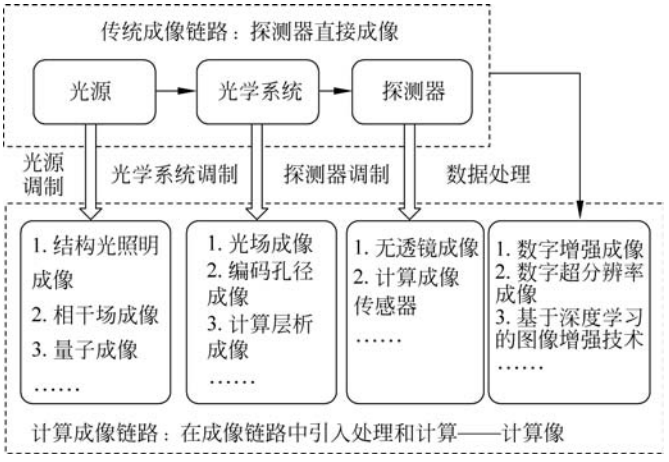
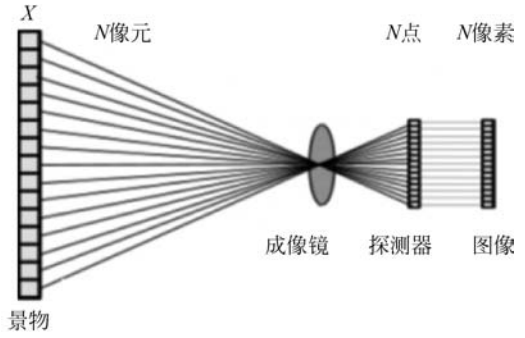
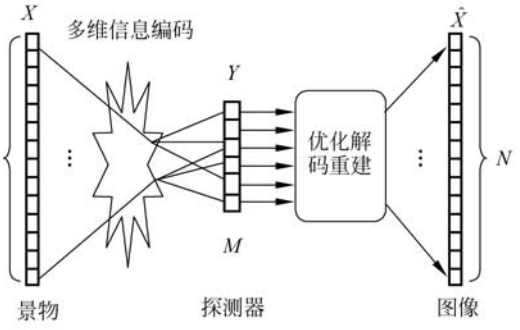


图 5.48　传统成像和计算成像



(a) 传统成像模式



(b) 计算成像模式

图 5.49 传统成像模式与计算成像模式比较

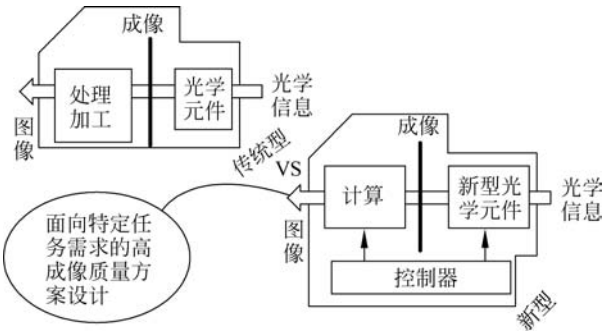


图 5.50 传统数码成像与计算成像的原理与技术综合对比

计算成像方法是在建立光的波动场、几何光学场和光波干涉场等模型的基础上，采用编码调制的方式，建立目标与观测点之间的变换或调制模型，然后利用逆问题求解等数学手段，通过计算反演来进行成像。这种计算成像方法实质上就是在目标和图像之间建立了某种特定的联系，这种联系可以是线性的也可以是非线性的，可以突破一一对应的直接采样形式，实现非直接的采样形式，使得采样形式更加灵活，更能充分发挥不同传感器的特点与性能。

5.7.2　计算成像的特点

计算成像具有以下特点：

(1) 采用新型光学元件、多种成像方式，各类新材料对于成像过程进行特定调制，从而耦合待采集信息。

(2) 以需求为目标设计新型成像系统，直接或间接地采集含有目标信息的多样化信号；最后利用现代计算机的强大计算能力，从采集得到的信号中恢复重建目标物体不同维度的视觉信号，或进一步调节成像光路，引入反馈机制，达到最终成像目的。

(3) 图像重建过程是软件编程的，可以根据需求改变成像模型，模拟实现多种类型的光学成像系统。可以说，计算成像是一种柔性相机，其光学系统具备实时改变能力。

(4) 具有开放的软件系统，可以给用户更高的自由度和灵活性，以产生与任务最相关的视觉信息，甚至可订阅需要的视觉信息。

(5) 通过赋予传统光学设计更多计算的特征，包括建模、优化、耦合与解耦等，克服了传统成像器件的不足与局限性，增强、扩展了数字成像技术能力，真正从系统层面处理整个成像过程，而不仅仅着眼于基础成像器件，从而能够生成更高维度，更多尺度，更为丰富，生动，更具有视觉表现力的多样视觉信息，突破传统成像极限，为生命科学、医学、材料科学、计算机视觉等领域带来了全新的发展契机。

应该指出的是，计算成像不是孤立于传统的透镜成像技术，是为了解决成像过程中存在的某些问题，而对传统的光学成像技术的处理方法或在成像过程中引入计算环境。计算成像虽然可以突破一些限制，取得一些效果，但成像模型中的多因素相互关联和制约，计算成像必须在多种参数中进行权衡，其利用计算方法重构或增强成像结果，有一定的技术优势，但也有其局限性，导致其在很多场景中应用受限。采用计算成像技术有得有失，得失需要均衡综合考虑。

5.7.3　计算成像的分类

计算成像可分为超衍射极限成像、无透镜成像、大视场高分辨率成像、透过散射介质清晰成像(基于波前整形的散射成像、基于光学记忆效应的散射成像)、偏振成像(偏振透雾霾成像、基于图像复原的水下偏振成像)、基于光子计数的成像、仿生光学成像[仿生多孔径成像、共心多尺度成像(根据有无中间像面分为开普勒型与伽利略型)]、计算探测器成像(直接型计算探测器成像、基于光谱调制的计算探测器成像)、三维成像(双目三维重构成像、基于结构光的三维成像、全息三维成像、偏振三维重构)、计算编码成像、波阵面编码成像、复合成像极弱光成像等。

从不同角度看，计算成像有不同分类。下面从各个维度成像分类、成像系统过程引入调制分类进行介绍。

1. 从各个维度成像进行分类

由于计算成像的发展，是基于全光函数的各个维度的观测，甚至更多附加维度的观测。从全光函数的维度出发，计算成像可分为空间维度成像、时间维度成像、角度维度成像、光谱(频谱)维度成像、相位维度成像、其他维度成像(如偏振特性、动态范围与极化)等。这里仅对其中的几类成像进行简单介绍。

1）空间维度成像

传统成像方法的空间维度成像主要受到 3 个方面的限制：

（1）使用光学方法成像会受到衍射极限的限制，难以实现分辨率超过 100nm 的显微成像。

（2）受制于物镜的成像分辨率和空间带宽积，目前的相机仅仅可以达到千万像素级别，难以实现更高像素数量的成像。

（3）难以解决视野范围和空间分辨率的矛盾关系，如果扩大成像的视野就会牺牲空间分辨率，而如果提升分辨率，就会使得观测的视野变小，没有办法对较大范围的对象进行精细成像。

因此，产生了计算超分辨率成像和大视野高分辨率两个方向的研究，通过改进成像的原理，实现了突破衍射极限的超分辨成像。其中，典型成像包括受激发射损耗显微技术（STimulated Emission Depletion，STED）、基于“光子可控开关的荧光探针”的光敏定位显微（Photo Activated Localization Microscopy，PALM）、随机光学重建显微（Stochastic Optical Reconstruction Microscopy，STORM）以及基于结构光照的显微成像（Structured Illumination Microscopy，SIM）。

2）时间维度成像

传统成像方法采用二维空间维度和一维时间维度的时空采样，成像的时间分辨率受到传感器感光灵敏度、数据转化和存储速率的限制，很难达到较高的时间分辨率。目前已经商用的高速相机最快的时间分辨率仅为约 1μs。近年来，超快速成像领域通过将场景的时间维度信息编码到空间维度或光谱维度，将成像的时间分辨率提升到皮秒甚至飞秒量级。该类典型成像有飞秒成像，可以通过精确地区分出多次散射和反射的传播过程，对不在视野范围内的被障碍物遮挡的物体进行成像，再结合特定光的不同传播时间，实现三维“拐角成像”的效果。

3）角度维度成像

在传统图像中，光线的角度信息几乎是完全丢失的，而这一信息却真实地反映了场景的光照、材质以及三维结构等性质。众多的计算成像技术通过采集同一场景在不同角度下的信息配合计算重建算法，以获得更高维或者高分辨率的场景数据。近年来，一些基于多角度信息计算成像的经典系统，从相干光、部分相干光到非相干光，从微观到宏观，从多角度光照到多角度采集，利用多角度信息能够在各类条件下恢复场景的高维高分辨率信息（例如，10 亿像素成像显微系统）。

总而言之，光照端多角度信息的引入，配合计算成像技术往往能以更低的成本突破传统透镜成像的极限，引入更多的三维信息，弥补成像透镜现有工艺水平上的不足，从而实现更高性能、更高维度的成像。采集端多角度信息的引入，则能够将物体的三维信息耦合至二维采样中，配合计算重构，使得通过二维传感器实现快速三维成像成为可能。

4）光谱维度成像

光谱信息能够反映出光源、物体以及场景的自然属性，因此光谱采集技术成为了进行科学研究与工程应用的重要工具。近年来，高分辨率超光谱成像技术的研究日益增多，基于超光谱成像技术得到的光谱信息为研究者与应用人员提供了场景更多的特征。

2. 从成像系统过程引入调制进行分类

从成像的过程来看（见图 5.48），一般光学成像系统分为光源（包括主动发射光源和被动接收光源）、光学系统、探测器、数据采集处理器。计算光学成像系统则是在成像系统过程

引入调制，一般可以分为光源调制型、光学系统调制型、探测器调制型、数据处理型。

1）光源调制型

光源调制型成像分为结构光照明成像、相干场成像、量子成像等。

（1）结构光照明成像：利用辅助的结构光照明（编码光源）获取物体三维像的技术，投影一个载频条纹到被成像的物体表面，利用成像设备从另一个角度记录受被成像物体高度调制的变形条纹图像，再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。结构化光源包括点结构光、线结构光和简单的面结构光。

（2）相干场成像（傅里叶望远镜）：利用相干场与被测目标相互调制，从返回的接收信号中提取被测目标空间频谱信息和运动参数信息进行计算探测的技术。该技术主要应用于空间目标的识别与遥测等领域。采用激光主动照明成像的方式，解决了深空暗弱目标亮度过低的难题。在相同等效口径条件下，采用发射望远镜阵列分布形式，大大降低了技术难度和成本，接收系统采用大量廉价低质接收器接收反射能量，进一步简化了系统，降低了成本。

（3）量子成像：是研究在光场量子特性下所能达到的光学成像极限问题。不同于经典成像，量子成像是利用光场的量子力学性质和其内在并行特点，在量子水平发展出的新的光学成像和量子信息并行处理技术。相对于传统光学成像技术通过记录辐射场的光强分布从而获取目标的图像信息的方法，量子成像则是通过利用、控制（或模拟）辐射场的量子涨落来得到物体的图像。

2）光学系统调制型

光学系统调制型成像分为光场成像、编码孔径成像、计算层析成像、干涉光谱成像等。

（1）光场成像：通过在普通相机镜头（主镜头）焦距处加微透镜阵列实现记录光线，再通过后期算法数字变焦。光场成像的过程包括光场的采集以及相应的光场数据处理。从结构上来分，光场的采集主要包括多相机组合和单相机改造两种方式。光场成像体现出的优势在于：任一深度位置的图像都可以通过对光场的积分来获得，因而无须进行机械调焦，同时解决了景深受孔径尺寸的限制问题；在积分成像之前对光辐射的相位误差进行校正，能够消除几何像差的影响；从多维度的光辐射信息中能够实时计算出目标的三维形态或提取出其光谱图像数据。

（2）编码孔径成像：对光线进行了调制，使光线穿过按不同变化规律分布的孔径，在接收平面上投影形成图像。使得来自不同物体点的光束达到像平面的同一位置，它们相互叠加、交错，所以接收像平面上获得了重叠的、退化的二维模糊像，即所谓的图像被编码了。

（3）计算层析成像：是由低维投影数据重建高维目标的一项技术，最早于1963年提出，在医学上起到了划时代的作用，但是由于计算机水平和探测器水平的限制，直到20世纪90年代层析投影成像开始应用于成像光谱技术。

（4）干涉光谱成像：通过光路中增加干涉仪，将入射光谱转换为干涉图，提高光通量和信噪比，通过重构变换得到原始光谱的成像方法。干涉型计算层析成像光谱仪是一种将空间调制傅里叶变换成像光谱仪（FTIS）的原理与计算层析成像光谱仪（CTIS）的原理相结合的一种新型成像光谱仪，具有高通量、高光谱分辨率以及高空间分辨率的特点。

3）探测器调制型

探测器调制型成像分为无透镜成像、计算成像传感器等。

（1）无透镜成像：无透镜成像最早见于X射线晶体学中的相干衍射成像（Coherent

Diffraction Imaging,CDI),因普通光学透镜对于 X 射线具有强吸收效应,故在 X 射线成像中,样品物函数需直接从其远场衍射斑重建。在感光器件之前直接对目标光进行编码或衍射,通过计算重构图像。无透镜系统具有高分辨率、大视场、无像差等特性,无透镜片上显微技术能实现像素级的成像分辨率、毫米级成像视场,通过使用像素超分辨算法预处理低分辨衍射图后,无透镜系统的成像分辨率能有效突破亚像素限制。无透镜成像又可进一步分为叠层扫描成像、多距离成像、多波长成像、多角度照明成像等。无透镜成像在成像结构上相对简单,但需要对目标光进行解算和重构来得到图像,其具有一定适用范围。

(2) 计算成像传感器:不同于传统的成像传感器的每个像元均匀分布的,且响应和排布都是均匀的情况,计算成像传感器是根据需求编程设定每个探测器不同的响应等参数。

4) 数据处理型

数据处理型成像分为数字增强成像、数字超分辨率成像、基于深度学习的图像增强技术等。

(1) 数字增强成像:对图像进行空间滤波、对比度变换等图像增强技术。

(2) 数字超分辨率成像:通过一系列低分辨率的图像通过不同的超分辨率重建算法重建得到一幅高分辨率的图像。超分辨率重建的核心思想就是用时间带宽(获取同一场景的多帧图像序列)换取空间分辨率的转换。

(3) 基于深度学习的图像增强技术:通过深度学习的方法,对不同图片进行训练,建立误差的特征模型,据此对图像进行增强处理。

5.7.4 波阵面编码成像及设计流程示例

波阵面编码成像是计算成像的一种,通过此例具体介绍计算成像。

波阵面编码(Wave Front Coding,WFC) 技术在成像系统中加入特殊非球面透镜[立方相位屏(CPM)],并辅以数字信号处理,能提供常规成像系统难以获得的优异性能。它使用专门的光学系统生成并捕捉被摄场景的编码图像,通过数字处理解码提供清晰图像。通过融合光学设计和数字信号处理技术,波阵面编码能扩大图像的景深。WFC 技术能够把解码步骤的计算过程做成对用户完全透明,可以由用户自己设计。实时的 WFC 成像系统方便易行并且具有较好的性价比。这种计算成像技术适合解决广泛的成像问题,提供包括免聚焦成像、增加景深、增加扫描阅读深度、校正像差(甚至包括单镜头系统)及弥补因装配和温度变化引起的失调等诸多解决方案。WFC 成像技术正在包括便携式摄像机(照相机)、显微镜、望远镜、机器视觉、红外成像等的系统中得到越来越广泛的应用。

波阵面编码成像是结合特殊非球面光学“编码”和 DSP“解码”的技术,以编码的形式捕捉图像,经由后续的数字处理得到最终的图像。通过在光学系统中加入 CPM 使得光学成像特性对于与散焦相关的像差不敏感。虽然光学系统并不能直接产生一个清晰锐利的图像,但是将数字信号处理应用于抽样图像可以产生一个清晰锐利的最终图像。该图像对于与散焦相关的像差不敏感。由此带来的最明显、最直接的好处就是,不必缩小光圈,就能大幅度扩展景深。它能够大幅度地提高成像系统的性能并或减少成本。波阵面编码成像系统的设计技术与传统成像系统相比是独特的。这是因为,为使系统性能达到最优,必须对系统的光学与数字处理特性进行共同优化。

1. 波阵面编码成像系统工作原理

图 5.51 是波阵面编码成像系统的组成方框图。

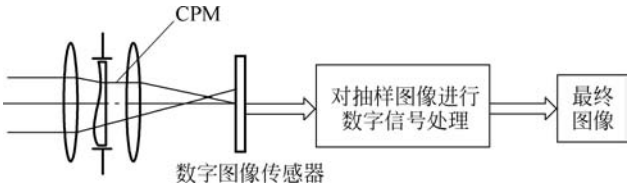


图 5.51　波阵面编码成像系统组成方框图

在光学系统区把一个特殊的非球面 CPM 光学元件靠近放置于光阑处，以改进传统光学系统。将该光学元件加入成像系统，图像上就会形成一种对散焦不敏感的经过仔细控制的特殊模糊或点扩展函数(PSF)。对抽样图像进行数字处理后，得到一个清晰锐利的图像，该图像也对散焦效果不敏感。

要使用波阵面编码技术，必须对整个数字成像系统进行专门设计。这不仅需要镜头系统的知识，还需要数字图像传感器的知识。传感器噪声值是一个重要的参数。因为对于一个给定的系统，它决定了在不降低分辨率的前提下可获得的性能提高值(例如，景深的增加值)。

2. 与传统的数字成像系统的区别

波阵面编码成像系统与传统的数字成像系统有两点根本不同。

(1) 通过波阵面编码镜头系统的光并不是会聚在一定的焦平面上，而是将一个特殊的表面 CPM 引入光学系统，放置在光阑位置，物像点不是在焦平面成像，而是在焦平面前后形成的一个扩展域内均匀地变模糊。这就是光通过光学系统被“编码”的情形。换言之，引入镜头系统的特殊波阵面编码表面改变了光线路径，使每条光线(除了轴向光线)偏离其固有路径，不会像在传统的光学系统中那样会聚于焦平面。传统系统的光线密度对于移动成像面或散焦极为敏感。相比之下，显然波阵面编码系统的光线密度对于成像面位置移动不敏感。波阵面编码系统的光线密度示意图还显示出，在镜头之后无法直接形成一个清晰的图像。要产生一个清晰的图像，必须进行后期数字处理。

(2) 波阵面编码系统的图像传感器所检得之图像不是清晰锐利的，因而必须由后续的数字滤波运算加以“解码”。经“解码”的图像是清晰锐利的，而且产生了诸多的改进属性。例如，就景深(或焦深) 而言，对于同样的 F 数，波阵面编码系统的景深远远大于传统的镜头系统。

3. 功能优点

功能与优点如下：

1) 景深扩展

传统扩展景深的方法就是缩小光圈，可是，镜头入光量也随之骤减。例如，光圈缩小一级，镜头进光量就减到原来的 1/2。一个典型的高速成像应用可能会要求光圈降至 $F/30$ 级别，为了获得有用的数据，必须加上数千瓦的照明。

在不缩小光圈或不增加照明的情况下，波阵面编码技术能够把景深扩大到原来的数倍。波阵面编码技术首先使用 CPM 对图像进行编码使之形成均匀恒定的散焦；之后，运用数字信号处理解码出清晰图像，实现成像系统景深的增加。使用该技术，一个理想的 $F/2$ 数字成像系统(理想的光学系统和理想的图像传感器)能够达到 $F/20$ 系统的景深水平；同时，还能保持 $F/2$ 系统原先的入光能力和空间分辨率。

2）降低光学系统复杂度而不增加像差

传统的镜头设计通常是对成本和质量的折中。对于量产镜头而言，成本和质量都首先与所使用的光学元件的数量和材质相关。为了消除多种不同的光学像差，典型的传统镜头一般都由若干玻璃透镜组成。像差会引起模糊，降低分辨率，使图像彩色显示不正确或移位。与散焦相关的像差包括球差、散光、场弯曲、色差。与温度有关的像差通常多发生于塑料光学材料上。

波阵面编码技术使得光学设计者能够减少用于图像处理的光学元件数目。此外，运用波阵面编码技术还能够调节各种像差，包括与温度相关的像差，因而可以使用塑料制造光学元件。波阵面编码技术提供了一个低成本、大批量生产的解决方案。

采用波阵面编码技术的大景深单片式镜头可以产生高质量的图像。依靠传统的镜头技术，可能用两到三片透镜组成的光学系统方可实现。这一类的波阵面编码系统通过传统的设计技术使像差尽量减小，剩余部分由光学设计和数字信号处理的组合来消除。

对于多组件镜头，包括定焦镜头或变焦镜头，其设计允许通过传统的光学设计控制较多的像差，而非通过波面编码。例如，对于给定的镜头速度或 F 数，一个传统的三片式镜头有着一定的景深。在传统设计中，镜头速度的增加意味着景深的降低。

一个使用波阵面编码技术的三片式镜头可以令其景深和速度均大为提高，并使其对数字处理的需求降至最低。依靠传统光学设计中的像差控制技术，使用波阵面编码技术的三组件镜头所需要的数字处理量比单片式镜头要少得多。

3）消除混淆失真

混淆失真通常会在传统的数字成像系统产生。当场景细节的空间频率高于数字传感器所能记录的水平时，空间细节信息不能被正确地记录，而反映为较低空间频率的伪象或混淆。发生混淆失真的数字图像看起来往往有一种彩虹效果。

广播级摄像机、民用摄像机和数字相机都会发生混淆失真。用波阵面编码技术应用于镜头系统，作为抗混淆光学滤波器的方案，性能优异且成本低廉。此外，波阵面编码技术使用非球面光学，实现了可调空间带宽，能够使各种数字图像传感器的性能得到最大限度的发挥。波阵面编码抗混淆滤波器能起到低通滤波器的作用，允许较低的空间频率通过并阻挡较高的空间频率。应用波阵面编码技术的抗混淆方案无须进行后期数字信号处理。

4. 一般设计流程

波阵面编码成像系统由非传统光学和对所得图像的数字信号处理组成。所采用的数字信号处理针对特定的光学系统。波阵面编码光学系统又取决于所采用的数字信号处理的类型与数量。由于光学系统与信号处理紧密联结，为达到系统最佳性能，自然要把光学和数字部件进行联合优化设计。这种设计难以直接使用通用的商业设计工具。为此，已有光学公司开发出专门的软件设计工具，与商业化光线追迹软件联合使用，可以提供波阵面编码系统的光学/数字优化设计。

光学部件的设计目标是使光学系统对于散焦效果的变化或敏感度最小化，以便进行高效率的信号处理。数字部件的设计目标是使算法复杂性、处理时间和数字处理后的图像噪声最小化。

波阵面编码设计程序是一个商业化的光线追迹软件。它不仅能生成波阵面编码表面形状，还能描绘出穿过典型的球面与非球面镜头的光路。

波阵面编码成像系统的通用设计内容包括：

(1) 传统光学表面、材料、厚度和间距；

(2) 波阵面编码表面的参数；

(3) 数字滤波器系数。

波阵面编码系统设计流程表述如下：

(1) 首先输入一定的光学表面、厚度和工作条件(波长、视场、温度范围、样本物体图像等)；

(2) 通过传统的光线追迹方法生成出瞳光学路径差(OPD)；

(3) 计算光学传递函数(OTF)；

(4) 计入与图像传感器几何特性有关的传递函数；

(5) 计算抽样的 OTF 和 PSF；

(6) 依据抽样的 PSF 选取数字信号处理算法，计算数字滤波器系数；

(7) 按照最小化原则形成指标数字(或波阵面编码操作数据)；

(8) 把波阵面编码操作数据和传统光学操作数据[Seidel 波阵面像差、波阵面 RMS(均方根误差)等]共同代入优化程序并修改光学表面；

(9) 返回步骤(2)，直至符合设计要求。

5.8　电子系统设计

光电探测、成像(非成像)、显示等各种光电系统，都不同程度地需要电子系统(单元电路、复杂电路、集成芯片组件、电子装置等)来完成电信号的采集、放大、处理、传输等功能。因此电子系统是光电系统的重要组成，甚至是核心组成，就像光电系统各组成部分的设计一样，电子系统设计也是光电系统设计的有机组成。在电子系统设计技术的几次变革中，历经了应用分离元件到 SSI(Small Scale Integrated circuit，小规模集成电路)、SSI 到 MCU(Micro Control Unit，微程序控制器)，一次次的创新和发展让电子系统设计中的难题得到了一次又一次的解决，也让电子系统的智能化水平得到了极大的提升。在 MCU 的出现后，电子系统设计水平迈上了一个新台阶。

5.8.1　电子系统的界定及分类

通常将由电子元器件或部件组成的能够产生、传输、采集或处理电信号及信息的客观实体称为电子系统。电子系统的构成依次为元件级、部件级、子系统级、系统级。电子系统的种类较多，从不同角度有不同的分类，总体上可分为：

(1) 模拟系统。从概念上讲，凡是利用模拟技术处理和传输信息的电子系统都可以称为模拟系统。模拟电子系统的主要功能是对模拟信号进行检测、处理、变换和产生。模拟信号的特点是：在时间上和幅值上均是连续的，在一定的动态范围内可以任意取值。这些信号可以是电量(如电压、电流等)，也可以是来自传感器的非电量(如应变、温度、压力、流量等)。组成模拟电子系统的主要单元电路有放大电路、滤波电路、信号变换电路、驱动电路等。

(2) 数字系统。从概念上讲，凡是利用数字技术处理和传输信息的电子系统都可以称为数字系统。由若干数字电路和逻辑部件组成，处理及传送数字信号的设备(单元)称为数

字系统。数字信号的特点是不随时间作连续变化。一个复杂的数字电子系统可分解为控制器加若干个子系统。这些子系统完成的逻辑功能比较单一，一般由中大规模集成电路实现，如存储器、译码器、数据选择器、加法器、比较器、计数器等。数字电子系统中必须要有控制器，控制器的主要功能是来管理各个子系统之间的互相操作，使它们有条不紊地按规定的顺序操作。可以分为以标准数字集成电路（如 TTL、CMOS 器件）为核心的电子系统以及以 MPU（Micro Processor Unit，微处理器单元）、MCU、PLD（Programmable Logic Device，可编程逻辑器件）、ASIC（Application Specific Integrated Circuits，专用集成电路）为核心的电子系统。

（3）模数混合系统。即模拟-数字电子混合系统。简单地说，包含有模拟电子电路和数字电子电路组成的电子系统称为混合电子系统。许多光电系统需要模拟-数字混合电子系统来实现。

此外还有 DSP 系统、嵌入式系统等。

5.8.2 ASIC 与 EDA

ASIC 是面向专门用途的电路，以此区别于标准逻辑（Standard Logic）、通用存储器、通用微处理器等电路。电子设计自动化（Electronic Design Automation，EDA）是指利用计算机完成电子系统的设计。

1. ASIC

在集成电路界，ASIC 被认为是用户专用集成电路（Customer Specific Integrated Circuit），即它是专门为一个用户设计和制造的。换言之，它是根据某一用户的特定要求，能以低研制成本、短交货周期供货的全定制、半定制集成电路。ASIC 的分类如图 5.52 所示。

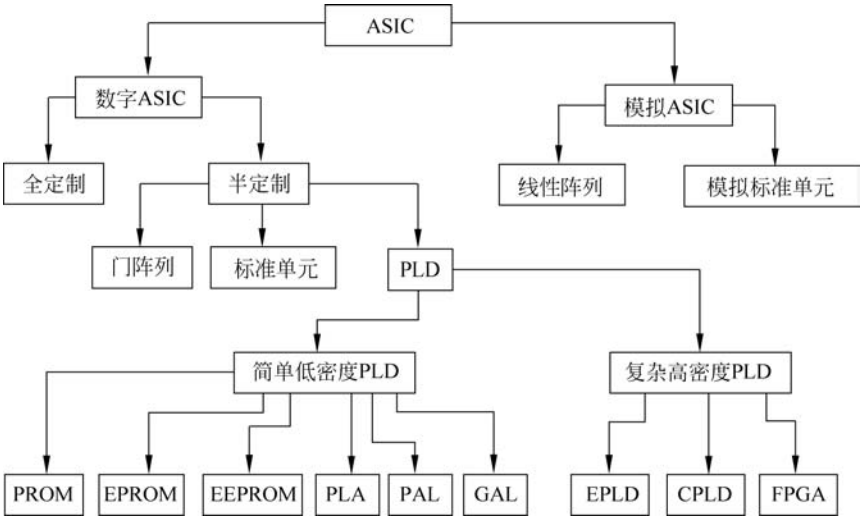


图 5.52 ASIC 的分类

在图 5.52 中，PROM 为可编程只读存储器（Programmable Read-Only Memory）；EPROM 为可擦除可编程 ROM（Erasable Programmable ROM）；PLA 为可编程逻辑阵列（Programmable Logic Array）（器件）；PAL 为可编程阵列逻辑（Programmable Array

Logic)(器件)；GAL 为通用阵列逻辑(Generic Array Logic)(器件)；EPLD 为可擦除可编辑逻辑器件(Erasable Programmable Logic Device)；CPLD 为复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device)。PLA、PAL、GAL 是早期的可编程器件，现在已基本不用了；目前常用的有 EEPROM、CPLD、FPGA。

PLD 是 ASIC 的一个重要分支，是厂家作为一种通用性器件生产的半定制电路，用户可通过对器件编程实现所需要的逻辑功能。PLD 是用户可配置的逻辑器件，它的成本比较低，使用灵活，设计周期短，而且可靠性高，风险小，因而很快得到了普遍应用，发展非常迅速。其发展趋势为：

(1) 向高密度、大规模的方向发展；

(2) 向系统内可重构的方向发展；

(3) 向低电压、低功耗的方向发展；

(4) 向高速可预测延时器件的方向发展；

(5) 向混合可编程技术方向发展。

2. EDA

EDA 技术是以计算机和微电子技术为先导，汇集了计算机图形学、拓扑、逻辑学、微电子工艺与结构学和计算数学等多种计算机应用学科最新成果的先进技术。一般采用自顶向下的设计方法，也叫正向设计，它是针对传统的自底向上的设计方法而提出的。已经在多种产业广泛应用，从设计、性能测试、特性分析、产品模拟等，皆可在 EDA 环境下进行开发与验证。这不但可大幅缩短开发流程，还可增加产品设计效能。EDA 所扮演的角色主要在于提供 IC 设计者的工具，最重要的功能是自动化减少晶片设计的时间并缩短制造周期，对 IC 设计业者而言，EDA 产业的提升，具有相当的影响性。在芯片设计领域，可以通过 EDA 将芯片的电路设计、性能分析、设计出 IC 版图的整个过程交由计算机自动处理完成。EDA 的发展大致经历了 4 个阶段。

第一阶段，20 世纪 60 年代中期—20 世纪 80 年代初期为 CAD 阶段，其特点是一些单独的工具软件，主要有 PCB(Printed Circuit Board)布线设计、电路模拟、逻辑模拟及版图的绘制等，通过计算机的使用，从而将设计人员从大量烦琐重复的计算和绘图工作中解脱出来。

第二阶段，20 世纪 80 年代初期—20 世纪 90 年代初期为 CAE(Computer Aided Engineering，计算机辅助工程)阶段，在集成电路与电子设计方法学以及设计工具集成化方面取得了许多成果。各种设计工具，如原理图输入、编译与连接、逻辑模拟、测试码生成、版图自动布局以及各种单元库已齐全。由于采用了统一数据管理技术，因而能够将各个工具集成为一个 CAE 系统。按照设计方法学制定的设计流程，可以实现从设计输入到版图输出的全程设计自动化。

第三阶段，20 世纪 90 年代为 EDA 阶段，微电子技术以惊人的速度发展，其工艺水平达到深亚微米级，在一个芯片上可集成数百万乃至上千万只晶体管，工作速度可达到 GHz。此阶段主要出现了以高级语言描述、系统仿真和综合优化为特征的第三代 EDA 技术，不仅极大地提高了系统的设计效率，而且使设计人员摆脱了大量的辅助性及基础性工作，将精力集中于创造性的方案与概念的构思上。

第四阶段，21 世纪至今，是现代 EDA 技术阶段。以计算机为工具，在 EDA 软件平台上，根据 HDL(Hardware Description Language，硬件描述语言)完成的设计文件，能自动地

完成用软件方式描述的电子系统到硬件系统的逻辑编译、逻辑化简、逻辑分割、逻辑综合及优化、布局布线、逻辑仿真，直至完成对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射和编程下载等工作。

EDA 的主要技术特点：

(1) 高层综合(High Level Synthesis，HLS)的理论与方法取得较大进展，将 EDA 设计层次由 RT 级提高到了系统级(又称行为级)，并划分为逻辑综合和测试综合。

(2) 采用 HDL 来描述 10 万门以上的设计，并形成了 VHDL(Very High Speed Integrated Circuit HDL)和 Verilog HDL 两种标准硬件描述语言。

(3) 采用平面规划(floor planing)技术对逻辑综合和物理版图设计进行联合管理，做到在逻辑综合早期设计阶段就考虑到物理设计信息的影响。

(4) 可测性综合设计。

(5) 为带有嵌入 IP(Intellectual Property，知识产权)模块(核)的 ASIC 设计提供软硬件协同系统设计工具，IP 核是具有知识产权的集成电路芯核的简称，其作用是把一组拥有知识产权的电路设计集合在一起，构成芯片的基本单位，以供设计时“搭积木”之用。

(6) 建立 CE(Concurrent Engineering，并行工程)框架结构的集成化设计环境，以适应当今 ASIC 的一些特点。

值得一提的是，EDA 有一个特殊性——它位于产业链的最上游。从集成电路的产业链来看，从上游到下游分别是 EDA 企业、芯片设计企业、芯片制造企业、终端企业。这种特殊性，使得 EDA 企业没有供应商。此外，EDA 是一种轻资产、智力性的工作，完全依靠工程师的创造性劳动，人才是最重要、最大的资产。EDA 已经是整个(光电)信息产业中的一个非常重要的工业软件，AI(Artificial Intelligence，人工智能)、5G(5th generation mobile networks 或 5th generation wireless systems、5th-Generation，第五代移动通信技术)等新技术的发展离不开 EDA 的支撑，在很大程度上，算法也要靠一些 EDA 工具来支持。同时对 EDA 行业来说，EDA 为加快计算速度，大力使用 AI 技术，将 AI 引入 EDA 工具的未来而言是至关重要的。具备 AI 特性的 EDA 工具将助力客户设计出更好的芯片，并快速推向市场。

5.8.3 一般设计方法

电子系统设计方法有自顶向下、自底向上，以及自顶向下与自底向上相结合的设计方法(以自顶向下方法为主导，并结合使用自底向上的方法)。这里指的“顶”即为系统的功能，这里指的“底”即为最基本的元件，甚至是版图。

自顶向下设计法如图 5.53 所示。自顶向下法的优点：尽量运用概念(抽象)描述、分析设计对象，不过早地考虑具体的电路、元件和工艺；抓住主要矛盾，不纠缠于具体细节，控制设计的复杂性；其要领是从概况到展开、从粗略到精细。

自底向上的特点是在系统的组装和调试过程中很有效，可利用前人的设计成果，但是部件设计在先，设计系统时将受这些部件的限制，影响系统性、易读性、可靠性、可维护性等。

自顶向下和自底向上结合的设计方法如图 5.54 所示。

电子系统设计的基本原则：满足系统功能和性能指标；电路简单；电磁兼容性好；可靠性高；系统集成度高；调试简单方便；生产工艺简单；操作简便；性价比高等。

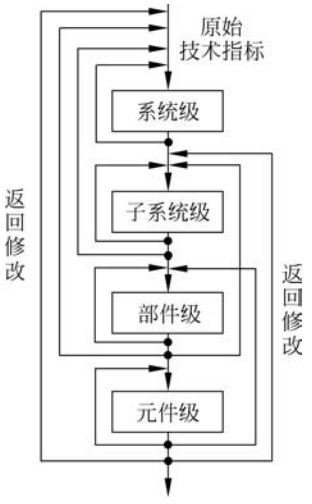


图 5.53　自顶向下设计法

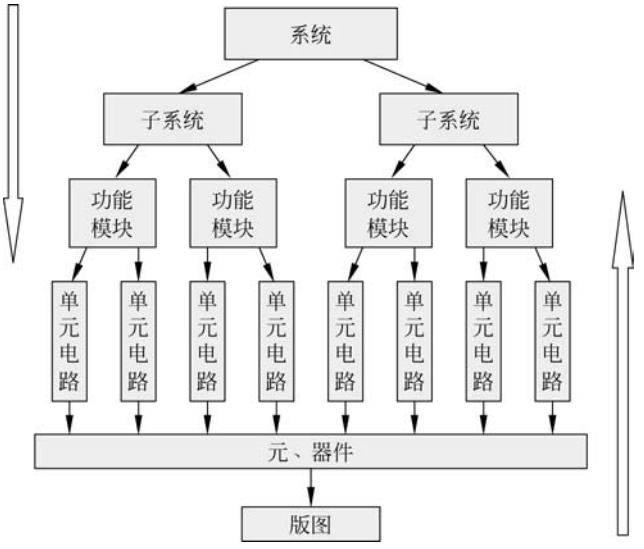


图 5.54　自顶向下和自底向上结合的设计方法

系统实现技术：

(1) 模拟技术，通常所使用的器件数量较少，但是对器件的依赖性较大、调试较困难、在与计算机配合方面不如数字技术方便。

(2) 数字技术，对器件的依赖性较小、调试较容易、与计算机配合方便、具有可编程功能。

(3) 软件实现，软件离不开硬件支持——单片机(计算机)、DSP、嵌入式系统等。

比较数字技术与模拟技术，数字电路靠逻辑、模拟电路靠经验。模拟电路在某些场合(高频、大功率、小信号等)无法被替代。系统设计的主体为数字技术，质量靠模拟技术。系统级的物理描述与设计包括：组成系统的各抽象子系统；各具体子系统(或 IP)；提出具体的要求并转入下一层设计。

5.8.4　以单元电路为基础的设计方法

以单元电路(电路板)为基础的设计，尽量选用高性能、控制简单、集成度高、应用广泛的新产品，通过查手册和网上查询，了解什么是关键指标，如何选择代用品。在进行单元电路设计时，必须明确对各单元电路的具体要求，详细拟定出单元电路的性能指标，认真考虑各单元之间的相互联系，注意前后级单元之间信号的传递方式和匹配，尽量少用或不用电平转换之类的接口电路，并考虑到各单元电路的供电电源尽可能统一，以便使整个电子系统简单可靠。另外，选择现有的、成熟的电路来实现单元电路的功能。有时找不到完全满足要求的现成电路，可在与设计要求比较接近的某电路基础上适当改进，或自己进行创造性设计。为了使电子系统的体积小，可靠性高，电路单元尽可能用集成电路组成。

以模拟器件为核心的电子系统设计流程如图 5.55 所示。以标准数字集成电路为核心的电子系统设计流程如图 5.56 所示。

1. 参数计算

在进行电子电路设计时，应根据电路的性能指标要求决定电路元器件的参数。例如根

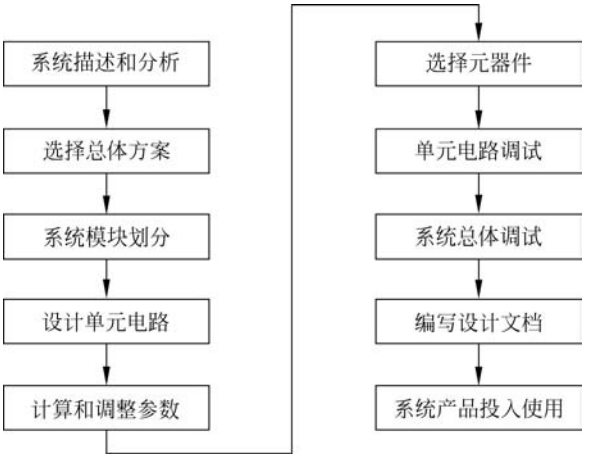


图 5.55 以模拟器件为核心的设计流程

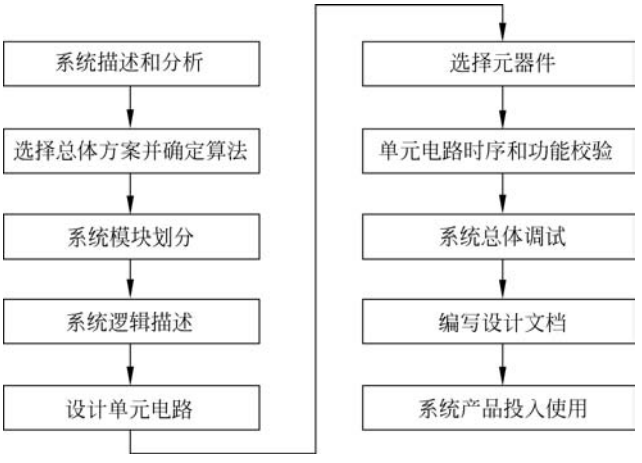


图 5.56 以标准数字集成电路为核心的设计流程

据电压放大倍数的大小，决定反馈电阻的取值；根据振荡器要求的振荡频率，利用公式，计算出决定振荡频率的电阻和电容值等。但一般满足电路性能指标要求的理论参数值不是唯一的，设计者应根据元件的性能、价格、体积、通用性和货源等灵活选择。计算电路参数时应注意以下几点：

(1) 在计算元器件工作电流、电压和功率等参数时，应考虑工作条件最不利的情况，并留有适当的余量。

(2) 对于元器件的极限参数必须留有足够的裕量，一般取 1.5～2 倍的额定值。

(3) 对于电阻、电容参数的取值，应选计算值附近的标称值。电阻值一般在 1MΩ 内选择；非电解电容器一般在 100pF～0.47mF 范围内选择；电解电容一般在 1～2000mF 范围内选择。

(4) 在保证电路达到功能指标要求的前提下，尽量减少元件的品种、价格、体积等。

2. 元件选择

电子电路的设计就是选择最合适的元件，并把它们有机地组合起来。在确定电子元件

时，应根据电路处理信号的频率范围、环境温度、空间大小、成本高低等诸多因素全面考虑。具体表现为：

（1）一般优先选择集成电路。由于集成电路体积小、功能强，可使电子电路可靠性增强，安装调试方便，可大大简化电子电路的设计。如随着模拟集成技术的不断发展，适用于各种场合下的集成运算放大器层出不穷，只要外加极少量的元件，利用运算放大器就可构成性能良好的放大器。同样，在进行直流稳压电源设计时，已很少采用分立元件进行设计了，取而代之的是性能更稳定、工作更可靠、成本更价廉的集成稳压器。

（2）电阻器和电容器是两种最常用的元件，它们的种类很多，性能相差也比较大，应用的场合也不同。因此，对于设计者来说，应该熟悉各种电阻器和电容器的主要性能指标和特点，以便根据电路要求，做出正确的选择。

（3）分立半导体元件的选择。首先要熟悉它们的功能，掌握它们的应用范围；根据电路的功能要求和元器件在电路中的工作条件，如通过的最大电流、最大反向工作电压、最高工作频率、最大消耗的功率等，确定元件型号。

3. 计算机模拟仿真

随着计算机技术的飞速发展，电子系统的设计方法发生了很大变化。EDA 技术已成为现代电子系统设计的必要手段。在计算机工作平台上，利用 EDA 软件，可对各种电子电路进行调试、测量、修改，大大提高了电子设计的效率和精确度，同时节约了设计费用。

4. 实验

电子设计要考虑的因素和问题相当多，由于电路在计算机上进行模拟时采用元件的参数和模型与实际元件有差别，所以对经计算机仿真过的电路，还要进行实际实验。通过实验可以发现问题、解决问题。若性能指标达不到要求，应深入分析问题出在哪些单元或元件上，再对它们重新设计和选择，直到达到性能指标为止。

5. 绘制总体电路图

总体电路图是在总框图、单元电路设计、参数计算和元器件选择的基础上绘制的，它是组装、调试、印制电路板设计和维修的依据。绘电路图一般是在计算机上利用绘图软件完成。

5.8.5　以芯片为基础的设计方法

从总体上说，电子系统基于芯片的设计方法与传统的设计方法比较如图 5.57 所示。顺便指出，有专家形象地比喻在 AI 的赛道上，算法为“天”、计算能力为“地”、芯片为“核心”，能否在 AI 上实现领先，首先要看在核心阵地（芯片）是否有所作为。目前，在 AI 芯片领域，主要存在图形处理器（Graphics Processing Unit，GPU，又称显示核心、视觉处理器、显示芯片）、FPGA、ASIC、类脑芯片四大流派。

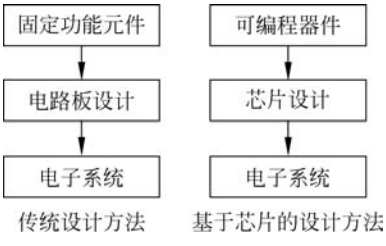


图 5.57　基于芯片的设计方法与传统的设计方法比较示意图

1. 一般设计流程

以 MPU 和 MCU 为核心的电子系统设计流程：确定任务、完成总体设计；硬件、软件设计与调试；系统总调、性能测试；编写设计文档；系统产品投入使用。

以 CPLD/FPGA 为核心的电子系统设计流程如图 5.58 所示。

以数字 ASIC 为核心的电子系统设计流程如图 5.59 所示。以模拟 ASIC 为核心的电子系统设计流程如图 5.60 所示，主要包括结构设计、拓扑选择、物理版图设计。

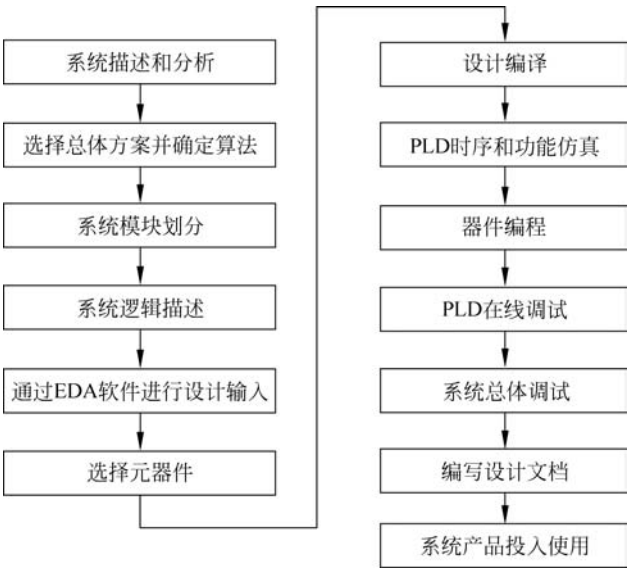


图 5.58　以 CPLD/FPGA 为核心的电子系统设计流程

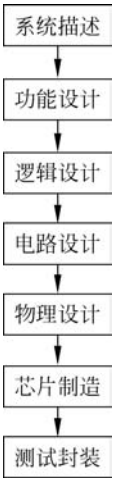


图 5.59　以数字 ASIC 为核心的电子系统设计流程

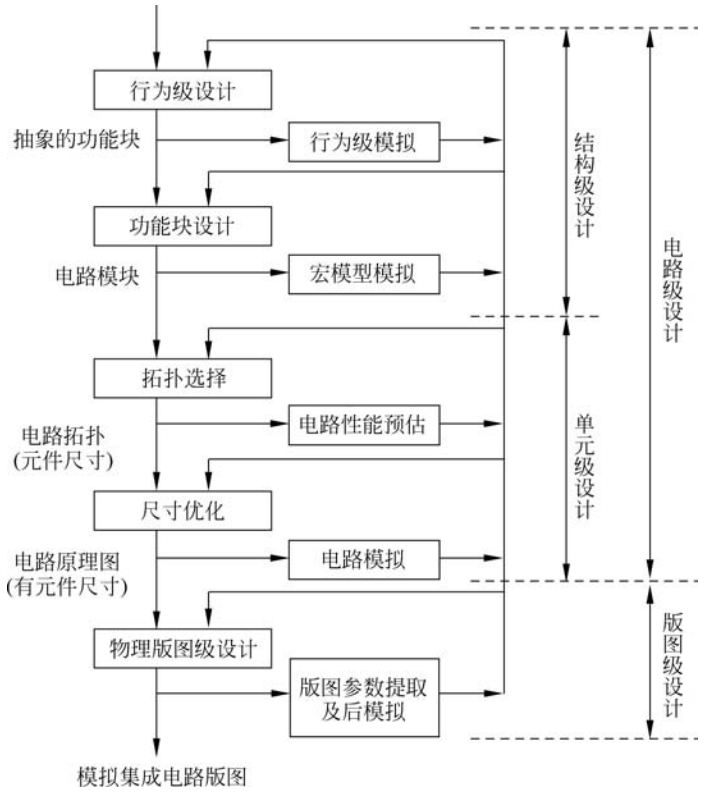


图 5.60　以模拟 ASIC 为核心的电子系统设计流程

以片上系统(System on Chip,SoC)为核心的电子系统设计流程如图 5.61 所示。

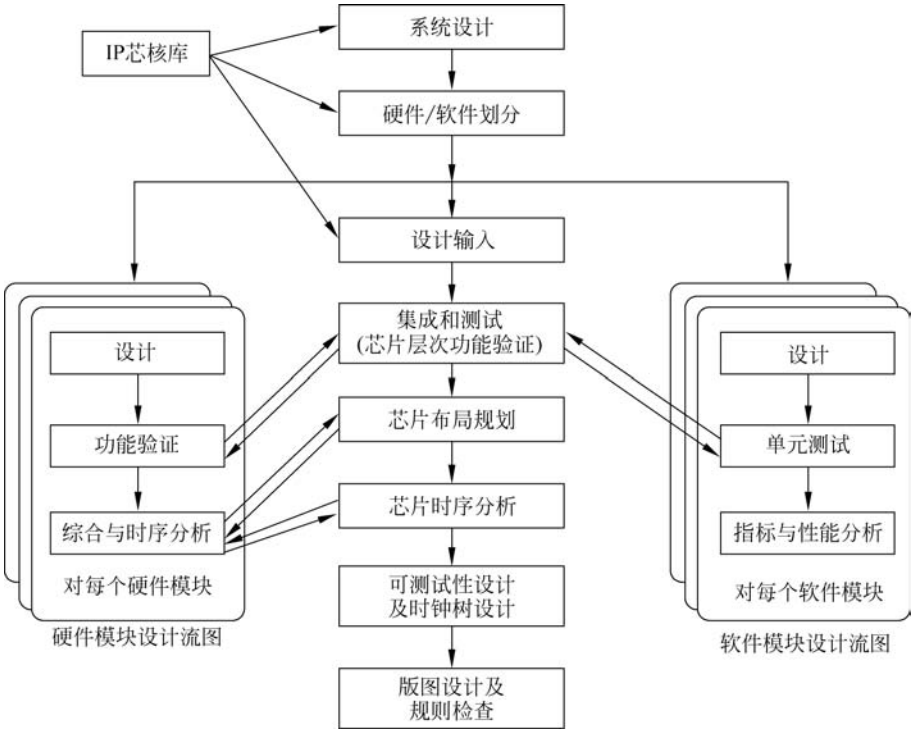


图 5.61　以 SoC 为核心的电子系统设计流程

2. 可编程逻辑器件的设计

对于可编程逻辑器件的设计方法有传统的系统硬件电路设计方法和 EDA 硬件电路设计方法。

1) 传统的系统硬件电路设计方法

在 EDA 出现以前,人们采用传统的硬件电路设计方法来设计系统。传统的硬件电路采用自下而上的设计方法。其主要步骤是:根据系统对硬件的要求,详细编制技术规格书,并画出系统控制流图;然后根据技术规格说明和系统控制流图,对系统的功能进行分化,合理地划分功能模块,并画出系统功能框图;接着就是进行各功能模块的细化和电路设计;各功能模块电路设计调试完毕以后,将各功能模块的硬件电路连接起来,再进行系统的调试;最后完成整个系统的硬件电路设计。

传统自下而上的硬件电路设计方法主要特征如下:

(1) 采用通用的逻辑元器件。

(2) 在系统硬件设计的后期进行仿真和调试。

(3) 主要设计文件是电原理图。

2) EDA 硬件电路设计方法

20 世纪 80 年代初,在硬件电路设计中开始采用计算机辅助设计技术,开始仅仅是利用计算机软件来实现印制板的布线,以后慢慢地才实现了插件板级规模的电子电路设计和仿真。

EDA 设计方法采用了自上而下的设计方法。就是从系统总体要求出发，自上而下地逐步将设计内容细化，最后完成系统硬件的整体设计。

利用 HDL 语言对系统硬件电路的自上而下设计一般分为 3 个层次，如图 5.62 所示。

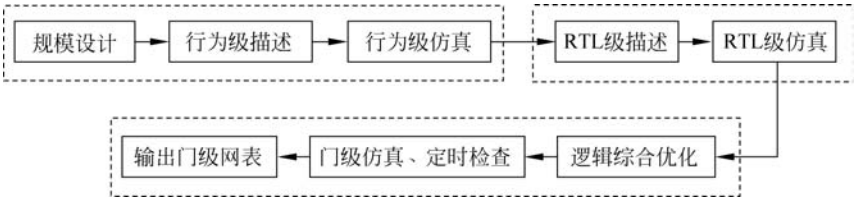


图 5.62　自上而下设计示意图

第一层为行为描述，它是对整个系统的数学模型的描述。第二层是 RTL（Register Transfer Level，寄存器传输层）级描述（又称数据流描述）。将行为描述的 HDL 程序，针对某一特定的逻辑综合工具，采用 RTL 方式描述，然后导出系统的逻辑表达式，再用仿真工具对 RTL 方式描述的程序进行仿真。第三层是逻辑综合。利用逻辑综合工具，可将 RTL 方式描述的程序转换成用基本逻辑元件表示的文件（门级网络表），也可将综合结果以逻辑原理图方式输出。RTL 级和门级简单的区别在于：RTL 是用硬件描述语言（Verilog 或 VHDL）描述理想情况下能够达到的功能，门级则是用具体的逻辑单元（依赖厂家的库）来实现其功能，门级电路最终可以在半导体厂加工成实际的硬件，一句话，RTL 和门级是设计实现上的不同阶段，RTL 电路经过逻辑综合后，就得到门级电路。

EDA 自上而下的设计方法具有以下主要特点：

（1）电路设计更趋合理；

（2）采用系统早期仿真；

（3）降低了硬件电路设计难度；

（4）主要设计文件是用 HDL 语言编写的源程序。

3）设计流程

可编程逻辑器件的设计流程如图 5.63 所示。

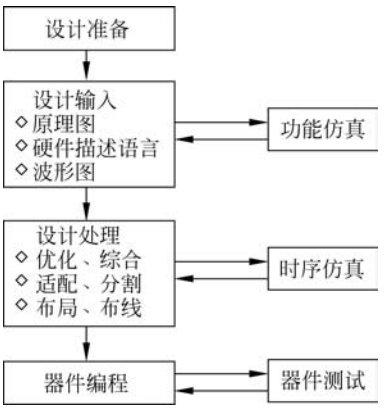


图 5.63　可编程逻辑器件的设计流程

（1）设计准备。在系统设计之前，首先要进行方案论证、系统设计和器件选择等准备工作。

（2）设计输入。设计人员将所设计的系统或电路以开发软件要求的某种形式表示出来，并送入计算机的过程称为设计输入。设计输入通常的形式如下：原理图输入方式；硬件描述语言输入方式；波形输入方式。

（3）功能仿真，也叫前仿真。用户所设计的电路必须在编译之前进行逻辑功能验证，此时的仿真没有延时信息，对于初步的功能检测非常方便。

（4）设计处理。设计处理是器件设计中的核心环节。在设计处理过程中，编译软件将对设计输入文件进行逻辑化简、综合优化和适配，最后产生编程用的编程文件。包括：语法检查和设计规则检查；逻辑优化和综合；适配和分割；布局和布线。

（5）时序仿真：时序仿真使用布局布线后器件给出的模块和连线的延时信息，在最坏的情况下对电路的行为做出实际的评估。

(6) 器件编程：通过编程方式改变集成电路的内部逻辑。

(7) 器件测试：验证器件设计指标是符合要求。

5.8.6　电子系统设计常用工具

设计工具硬件类包括：示波器；函数发生仪；数字万用表；直流稳压电源；逻辑分析仪、频谱分析仪；仿真器；编程器等。

设计工具软件类包括：

(1) 模/数电路仿真——PSPICE、EWB、Multisim。

(2) 电路板设计工具——PROTEL、Power PCB、ORCAD。

(3) 单片机开发软件——Keil C51、伟福等仿真器配套软件、MCU 厂商配套软件(如 MPLAB IDE、ADS)。

(4) CPLD、FPGA 开发软件——Quartus Ⅱ、MaxPlus Ⅱ(ALTERA)；ISE(XILINX)。

(5) DSP 开发软件——CCS(TI)、Visual DSP(ADI)；MATLAB、Simulink、Systemview。

(6) SOC 设计软件——Synopsys、Mentor、Synplicity 等公司的开发套件。

(7) EDA 工具——Active-HDL、FPGA-Express、Cadence、Verilog-XL、NC-Verilog 等，国产的有熊猫 ICCAD 系统(1993)、九天 Zeni 系统、模拟电路 EDA 全系统工具、ALPS、Empyrean ALPS-GT、Empyrean Qualib 等。