

一种作为微型无人机有效载荷的 微型红外传感器

●王 帅

摘要：微型无人驾驶飞行器（无人机）是一类小到仅靠一个或两个人就可以运输、发射、操作和回收的飞机。这已不是个新概念，美国军方在过去15年已经在限量应用。但随着飞行器的体积和费用降低，其潜在应用正在增加。通过一个或多个机载传感器实时传输回控制器数据，对军方和执法机构的远程侦察有着重要的意义。一般来说，一个微型无人机能够按预编程路线自动飞行，也可以选择手动飞行。在完成使命、飞行器返回着陆后，它可以快速拆卸和存放，以便下次使用。热成像扩展了微型无人机的应用，使其在完全黑暗和有限的照度时也可使用，但以前的热成像仪由于过大和过重而无法安装。1999年，在引进Indigo系统的Alpha™摄像机后，这种情况得以改变。它创造了一类新的热成像产品，称为红外“微传感器”。当时，它比其他任何红外热成像仪都更小、更轻。而且Alpha™是第一个可方便安装到微型无人机前部的摄像头，其低功耗也是一个关键功能。基于研制Alpha™的成功经验，Indigo接着研制出了更微型的Omega™相机，打破了Alpha™创下的所有记录：小尺寸、重量和功率。Omega™已经成功地安装在一些微型无人机上，其中包括波音的指针和乌鸦，以及BAI Aerosystems公司生产的蛇眼无人机。本文描述了Omega™为这些飞机平台和其他平台所做的设计，并讨论了更小的微型传感器未来的前景。

1 微型无人机的特点

便携式无人机的一个主要战场优势是能够提供远程侦察预警而不用直接将士兵暴露在敌人的视野下。由于它们可以由不需进行太复杂培训的一小队人员进行操作，因而微型无人机非常适合侦察部队侦查敌军集结活动、伏击或潜在的障碍。在建筑物之上的空中通过飞行传感器提供位置信息，对于在城市地形中的军事行动（MOUT）而言是一个巨大

的资源，它可以优化部队部署及避免遇到小型不利的抵抗。这种微型无人机也可由连级指挥官用于援助巡逻、监视周边、前向观察、搜索和救援行动。它的另一个应用是与无人值守地面传感器（UGS）网络进行协作。通过地面传感器检测到入侵，微型无人机可以迅速在其附近进行检测，并在UGS网络之外跟踪入侵者。

基于这种微型无人机的应用，可确定一些关键系统的要求：

易于运输：为了获得更有效的机动性能，一个微型无人机必须单兵携带。这就要求系统重量轻，这个“系统”不仅是指飞行器本身，而是所有的辅助设备，包括地面站、包装容器和备用电池。最低装载尺寸必须控制在理想的情况下，整个系统应当由一个单一载体运输。该系统还必须能够快速组装和拆卸，以支持快速展开/快速撤离。

易于发射：快速展开的另一个先决条件是，发射飞行器对场地要求很少或根本没有要求。在狭窄的空间操作，如在城市地形，另一个重要方面是，它可以在一个小发射区内完成发射，理想情况下，起飞时仅用很少或根本不用辅助设备。

容易操作/容易降落：实际上，操作微型无人机的都是非专业人员，因此，一个关键要求就是操作飞机和使其着陆的能力都不需要经过太高级的培训。这项要求需要微型无人机具有自动导航的自主能力，并按预编程路线飞行。因为着陆是最难操作的，无论是简化的降落程序还是自动着陆能力都是必不可少的。

可靠性/鲁棒性：为了进行周边监视这样的应用，该系统几乎要全天候反复地执行飞行任务，很少或根本没有休息时间。这一目标意味着要具有非凡的可靠性。此外，由于着陆环境恶劣，飞行操作员缺乏先进的经验和技能，失误是不可避免的。因此，必须有强大、坚固耐用的设计以承受偶尔的失误。也就是说，飞行器的费用必须足够低，可以视为消耗品，特别是它飞行在小型武器射击范围内。

隐蔽性：为了尽量减少被敌人探测和攻击的机率，一个微型无人机应具有隐身功能。因此，首先要求视觉安全；听觉安全要求有一个安静的推进系统，如电动马达。必须接近目标的无人机比装载更高性能传感器、能够在更高高度有效工作的无人机被探测和摧毁的概率更大。

远程/长航时：飞机在许多应用中的能力是与其相对地面站的最大工作范围成正比的。目标跟踪、前向侦察及周边监视应用，都需要更大的远程能力。

即使是情况监测这样的定点应用，在补给燃料之间进行长时间飞行都会极大地减小搜索范围。飞行时间主要受电池容量限制，可以通过降低风阻、飞行器重量和耗电量来延长飞行时间。

有效载荷的灵活性：集成多传感器提高了微型无人机系统的实用性。理想情况是，几个传感器可同时装载飞行。例如，前视成像仪可用于导航和搜索，侧视成像仪可以监视飞行范围内感兴趣的区域。即使飞机可容纳多个传感器，在飞行器之间快速方便地互换有效载荷的能力也是很重要的。例如，在白天，可见光摄像仪对于操作手发现一个可视目标可能会很有效；但在黄昏或当战场充满烟雾时，微型无人机就要安装热成像仪。

2 有代表性的无人机平台

指针 (Pointer)：波音公司的指针如图 1 所示，作为微型无人机工业的先行者，它的首次飞行可以追溯到 17 年前。它是一个实地验证系统，仍然在被美国的军事和各执法机构使用。相比较更现代的系统，它的体积相对较大——翼幅 2.7 m (108 in)，重 3.6 kg (8.0 lb)。然而，完整的系统可以打包装在 3 个便携式箱子里，便于一组两个人携带。在不用辅助工具的情况下，不到 5 min 就可以组装完成，然后手抛式发射 (见图 2)。指针包含一个先进的自动导航系统、军用 GPS 接收机和车载电子设备，以提高稳定性。无线电连接可供在 5~10 km (3~6 mile) 的范围内实时视频传输。为了免除准备着陆地带 (和先进的试验技能) 的需要，着陆时通过一个自动延迟开伞装置保持微型无人机稳定地下落到地面。



图1 波音公司的指针无人机



图2 指针无人机手抛式发射

乌鸦 (Raven) :目前, 波音公司研制的是命名为乌鸦的另一种微型无人机系统, 如图 3 所示。



图3 波音公司的乌鸦无人机

它只有大约指针一半大小, 翼幅 1.3 m (51 in), 重 1.8 kg (4.0 lb), 具有类似的性能特点 (见表 1)。乌鸦使用与指针相同的地面控制站, 并具有相同的 4 个自动导航模式: 高空巡航、定点导航、自动巡航和自动回航。乌鸦原型机首次飞行是在 2001 年 10 月, 正在进行高级检测。

表1 指针无人机与乌鸦无人机对比

	Pointer	Raven
Link range	5~10 km (3~6 miles)	5~10 km (3~6 miles)
Flight speed	35~80 kph (22~50 mph)	43~96 kph (27~60 mph)
Duration	90 min	80 min

蛇眼 (Snake Eye) :蛇眼无人机系统是由 AeroSystems 公司开发的, 用于向前沿部署部队提供对其活动区域的监测及武力保护。该系统是完全便携式的, 仅需两名人员即可进行部署和操作。蛇眼包含多个传感器有效载荷, 包括彩色可见光、黑白

可见光和红外成像系统 (见图 4), 以及核-生化 (全国广播公司) 探测器。它们被装在可以互换的机头组件里, 以便精确地“捕捉”到目标。这使蛇眼可在数秒内重新装配。



图4 BAI公司蛇眼可互换的鼻部

蛇眼拥有 1.2 m (48 in) 翼幅, 复合机体重量只有 2.5 kg (6 lb), “即飞”设置如图 5 所示。飞行器包括电池供电的电动推进系统, 可以提供长达 1 h 的飞行时间和 10 km (6 mile) 航程。该飞行器在空中 100 m (328 ft) 飞行时地面几乎听不到。



图5 BAI 公司蛇眼无人机

蛇眼无人机的目标是操作最简化。地面控制站 (综合布线) 装在一个小防水箱里, 由 SINCGAR 兼容 (广管局- 5590 / ü) 电池供电, 包括耐震笔记本电脑、任务规划和移动地图软件、用于实时视频显示的高清视频护目镜和高增益方向接收天线, 如图 6。该架飞机采用一个简单而可靠的发射系统 (见图 7) 进行发射。在飞行中, 它可自主使用飞行可编程 GPS 飞行控制系统。该飞行器还可以自主着陆。



图6 蛇眼无人机控制部分



图7 BAI公司蛇眼无人机发射

经过数百次试飞,BAI的蛇眼显示出特殊的耐久性。模块化设计与单元组件(机头、机翼、机身和机尾)集成在一起非常有效。如果飞行器在飞行或降落过程中遇到障碍,这些组件将“脱落”。因此,当飞行器与树木、建筑物、飞行器相撞时会将损害降到最低。虽然军方认为这一系统是消耗品,但BAI发现,即使在未改善的区域飞行,大多数蛇眼无人机的损害也极其轻微,且大部分是表面的。

3 红外载荷的必备条件

基于微型无人机系统的特征,红外成像有效载荷应具备以下几个关键条件:

轻量化:有效载荷传感器的应用要求中最重要的是重量。沉重的传感器将破坏重心,在机头部分需要增加压载物来抵消增加的重量。有效载荷的重量和压舱物会降低机动性、最大飞行速度及缩短飞行时间。

体积小:对于现有的飞行器,如“指针”、“乌

鸦”、或“蛇眼”,最佳传感器必须满足给有效载荷留有足够空间的要求,否则不予采纳。即使安装一个传感器仍具有灵活性(例如,在一架设计尚未完成的概念机上),但由于阻力性能的影响,体积小仍是最关键的。受重量-机动性、空速、飞行时间影响的同样参数也更受阻力的影响。如果加大飞行器体积以适应大传感器,飞行器的性能将降低。小传感器另一个引人注目的优势在于它为多传感器有效载荷提供了更多的潜能(例如,前视与侧视)。

低功耗:最大限度地减少板载传感器的耗电量,可为飞机的推进系统及无线连接保留更多的电池容量。因此,一个低功耗热像仪有助于飞行时间更长和射程更远。

标准接口:为了方便传感器交换(例如,热可见光),使用标准接口是至关重要的。简单的“内电源、外视频”热传感器的操作,有助于直接与其它板载电子产品接口,特别是如果传感器能够不用飞机电池直接运行的情况。标准视频协议,如NTSC系统,比自定义视频信号更可取。

耐用:对于飞行器来说,如指针,是通过使飞行器熄火迫使它下降着陆到地面的。由于热成像传感器位于飞机的机头突出部分,着陆时特别易损,特别是碰到硬物时。虽然我们不可能不切实际地期望传感器从高空自由落体后仍能使用,但是,它的抗冲击性越强,这种经受严酷着陆的可能性就越高。

宽视场:由于其小尺寸和重量的要求,便携式无人机系统包括一个稳定的框架来主动控制传感器视线是不切实际的。因此,视场(FOV)过于狭窄是有问题的,因为即使是最有经验的飞行员,在平稳条件下飞行,都难以维持飞机相对地面上的目标的角位置。在动荡条件下,或者经验有限的操作员在一个狭窄的目标视野内保持目标的概率将更低。另一方面,考虑到空间分辨率,视场太宽也是不可取的。低传感器分辨率迫使飞行器飞行高度更低,致使飞机更容易被敌人发现和攻击,更不用说树木、

建筑物及其他障碍了。多镜头传感器的选择提供了最灵活的视场，更适应各种任务。

高灵敏度/快速帧频：在微型无人机的多种操作情况下，镜头热对比低、灵敏度高对于目标探测和兴奋点识别是至关重要的。由于飞行器高速前进，镜头成像十分不稳定。因此，需要快速帧频从而避免视频信号中出现污迹或不平稳。

4 作为无人机载荷的 OMEGA™

在 1997 年 Indigo 系统开始开发其微产品线时，市场上还没有红外热成像产品出现，即使是适合远程安装在微型无人机上的产品也没有。为了改变这种状况，Indigo 专门设计了优化后重量、体积和能耗都非常低的相机。研发经费部分由美国军队以两用科学和技术 (DUST) 合同形式提供，该合同是为政府服务的飞行器基金项目，基金来源于具有实质军事价值的商业产品的临时性工程 (NRE) 费用。其中一个开发成果是 Alpha™ 相机，它 1999 年投产，是世界上第一台微型热像仪。它被装载于多个飞行平台，并被公认为是微型无人机行业的突破性产品。然而，Indigo 第二代微型传感器的出现已经逐渐取代了 Alpha™。Omega™ 相机于 2002 年全线投产，对其第一代产品的每一个重要方面均进行了改进（见图 8 和表 2）。本节以下部分将介绍 Omega 小型化产品具体的设计特点。

非制冷红外操作：从发展历史来看，非制冷热探测器在无活跃的温度稳定性的平面阵列 (FPA) 情况下无法操作，通常是以热电冷却器的形式出现。

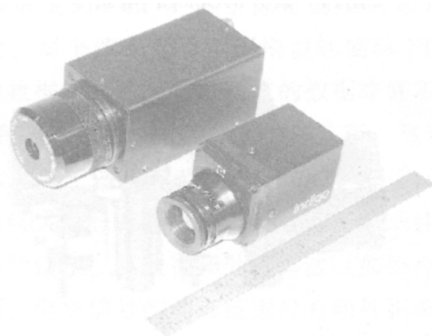


图8 Alpha™与 Omega™尺寸比较

表2 Alpha™与 Omega™对比

	Alpha	Omega
Weight	186 g(6.5 oz)	114 g(4.0 oz)
Volume	175 cm ³ (10.7 in ³)	77 cm ³ (4.7 in ³)
Power	≤2 500 mW	≤1 500 mW
NEdT f/1.6,30 Hz	≤100 mK	≤85 mK
Temp Range	0 ~+55 °C (32~+131 °F)	-40~+55 °C (-40~+131 °F)

与 Alpha™ 和其他热成像产品相比，Omega 性能提高的一个主要驱动因素是消除了热电冷却器。热电冷却器有许多致命的缺陷，包括增加体积所引起的明显缺陷（近 5 cm³，不包括驱动器电子）。电力问题是一个核心问题，特别是在大温度范围内的操作。如同环境温度和固定的 FPA 温度增长的差别，热电冷却器线路所消耗的电力超过了其他电力系统的总和。在操作过程中改变焦平面设定点（如环境温度变化）并非一个好的选择，因为在转换期间会丢失有效的视频数据。刚开启时，当平面阵列从过冷或过热的温度转变到稳定温度时，也会出现一个有效视频的延迟。对于微型无人机的应用，当操作员等待确认有效载荷工作正常时再发射，意味着发射被推迟 1 min。去除热电冷却器极大地降低了相机设计的复杂性，从而允许采用较小的真空封装、简单的电子产品和更简单的配件。它也提高了在更宽温度范围内的操作性能，在瞬间开启时大大提高了电源管理。

去除热电冷却器却要维持平面阵列加热或冷却的均匀性是一个极大的挑战。未冷却的探测器对温度变化极为敏感，如果参数略有不同甚至只是像素到像素的轻微改变，图像质量也将随温度变化而降低。通过将专用电路读出法和非均匀性校正算法 (NUC) 结合的新方法，Omega™ 是第一个解决均匀性问题的红外相机之一，并且在整个操作条件范围内保持了良好的图像质量。利用先进的温度补偿算法，可以在极宽泛的温度范围内尽量减少像素的变

化行为,这意味着只需要使用 NUC 的 3 个工作台,即可使摄像头的工作温度范围控制在 $-40\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其它的无热电冷却器的镜头需要更多的 NUC 工作台,从而消极地影响了内存要求、尺寸、成本、校准及系统的复杂性。

紧凑的光学设计:小型化 OmegaTM 的另一个重要基础是非常紧凑的光学设计。镜头中使用的红外光学元件通常采用锗或其他重材料,光学组件往往在热像仪总体重量中占有很大比例。因此,减小镜头体积是一个极好的降低系统重量的手段。减小孔径尺寸(如较慢 F 数)是减少透镜组件的简单直接的办法。然而,光学信号的汇集能力与孔径面积成正比。探测器阵列固有的敏感性较差,因而需要大的强光以弥补性能不足。相反,高灵敏度阵列支持较慢 F 数的紧凑的光学设计。Indigo 系统内部采用了 FPA 的 OmegaTM 相机设计,以实现最佳信噪比(SNR),从而在 $f/1.6$ 时产生 $< 85\text{ mK}$ 的等效噪声温度(NEDT)。采用 $f/1.6$ 设计,每个 OmegaTM 镜头的截面组件比常用的 $f/1.0$ 光学非致冷探测器的体积可缩小近 60%。OmegaTM 提供 3 种镜头,如图 9 所示。这些镜头组件在不同的使用领域可以互换,能提供 $40^{\circ}\times 30^{\circ}$ 的宽视场、 $25^{\circ}\times 19^{\circ}$ 的中视场及 $15^{\circ}\times 11^{\circ}$ 的窄视场。



图 9 3 种 OmegaTM 标准光学镜头

另一种缩小 OmegaTM 相机镜头组件的手段是简化机械设计。热成像仪使用内部快门或其他统一表面以定期更新 NUC 项。在更新过程中,快门旋转到成像区域,像素响应正常化。AlphaTM 相机的快门嵌套在光学组件中,因而导致直径大幅增加。OmegaTM

相机的快门组装在传感器的正前方,如图 10 所示,其机械设计更简单、更紧凑。

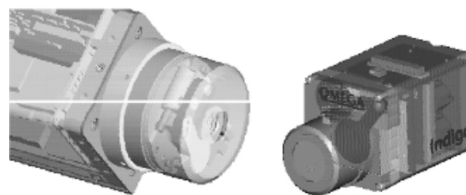


图 10 AlphaTM 与 Omega 快门封装比较

优化电子封装:除了紧凑的光学部分, OmegaTM 使用新型电子产品封装,以减小相机的尺寸。为了尽量减小摄像头的截面,集成电路卡的大小与传感器封装的空间相同。其结果是多个电路板堆叠在一起。采用标准表面贴装或通孔连接器互连堆栈将占用电路板很大比例,从而迫使电路板增大。因而用柔性电路板(图 11)取而代之,它包括 4 个 $3.0\text{ cm}\times 3.0\text{ cm}$ ($1.2\text{ in}\times 1.2\text{ in}$) 的部分,相互之间采用集成柔性带连接。几部分都是平行的,因而电路板可以折叠,可折叠组件直接与传感器封装连接。主板面在垂直平面提供了 I/O 接口与外部连接。如图 12 所示,其结果是好像一个密集的电子“魔方”。

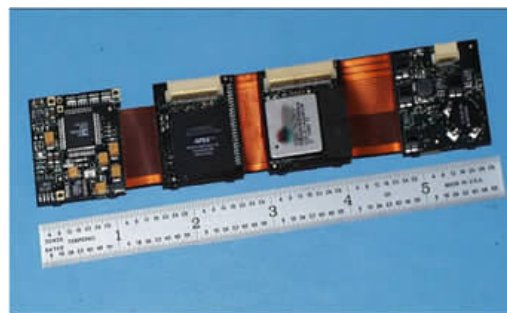


图 11 展开的 OmegaTM 电路

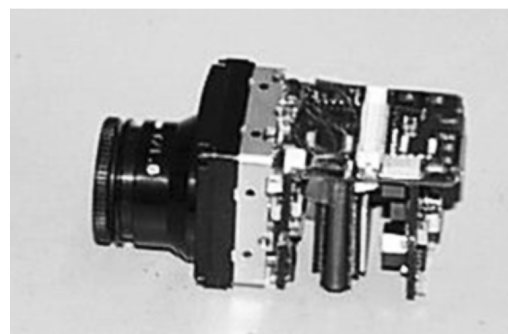


图 12 折叠的 OmegaTM 电路

5 电子系统的未来

比以前小型无人机系统更小的是另一种被称为“微型”的无人机。翼幅 $<15\text{ cm}$ (6 in)，该系统，如波音公司的黑寡妇（图13），代表了一种有巨大挑战的有效载荷设计。即使是微小的 OmegaTM 相机对该应用来说体积也太大，它需要一个 $1\sim 10\text{ g}$ ($0.04\sim 0.4\text{ oz}$) 量级的有效载荷。在4年前缺乏适当的红外有效载荷用于微型无人机时，该情形只能依靠模拟；如今也没有红外成像仪（甚至接近的也没有）可以适合安装在微型无人机上。在不久的将来是否会改变这种状况？本节将讨论一些潜在的设计方向，以助于推动另一个减小尺寸/重量的飞跃。

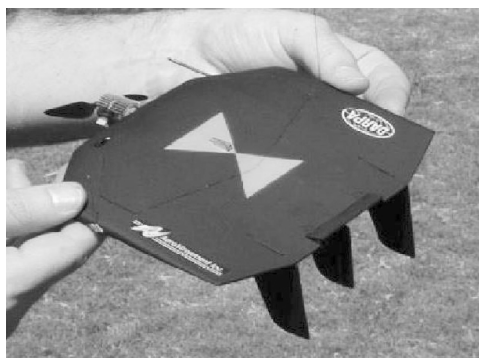


图13 波音公司黑寡妇 UAV

电子分割：热像仪的数据最简化形式，包括数据采集、非均匀性校正处理（NUC）和视频处理，如图14所示。数据采集包括感知每个探测器热致电压改变（例如，偏置1个微测元件）、复用每个像素的信号及数字化。这样做的结果是数据流动态范围大（典型情况 $>14\text{ bit}$ ）。由于像素的反应通常不一致，因此，每个像素都要使用增益和偏移 NUC 项。除非原始数据格式，否则未矫正的数据非常不一致，NUC 处理不会整体降低信号的动态范围。显示系统一般都远远低于该动态范围（ $<8\text{ bit}$ ），因此视频处理算法将大动态范围缩小，一般采用非线性变换，以利于后续使用。其他视频处理算法（如极性反转）也可以用，但对信号的动态范围没有额外影响。

一种减小系统尺寸的方法是将处理器与 FPA 集

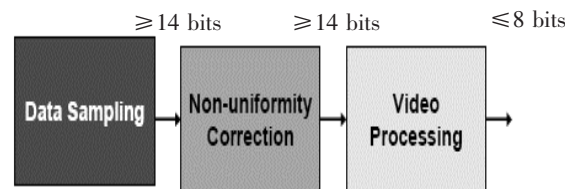


图14 热像仪的典型数据流程

成。片上 ADC 与部分 NUC 处理加载到 FPA 的情况并不少见，但在 FPA 上执行视频处理算法一般都过于复杂。无人机应用的另一个策略是将一些信号处理分离给地基电子器件执行。但这种划分很可能会增加无人机和地面站传输信号之间的下行带宽，因为“上游”的视频处理具有较高的动态范围。然而，对于小阵列尺寸或缓慢帧频来说，更高带宽可能不会成为问题。因此，所有的信号处理都可以集成到 FPA 上或转移到地面，从而只需要小得多的板上电子封装。使用基于场景的 NUC 就无需快门集成，因而可实现包括传感器封装、镜头组件及小电子元件的非常紧凑的有效载荷。

选择性光学设计：常用于制作红外镜头的材料密度大，因此光学组件通常很重。如前所述，一个众所周知的做法是通过增加 F 数来减小镜头尺寸。然而，即使在 OmegaTM 上安装 $f/1.6$ 这样的镜头，重量也大约有 30 g (1.1 oz)，比预想的装在微型无人机上的总有效载荷重了几倍。较慢的光学设计不太可能产生显著减重的效果。其他减轻光学组件重量的潜在渠道是采用衍射元件和替换材料。衍射元件基本上消除了镜头部件设计采用的大多数大体积材料，同时还保留了其光偏折性能。该技术目前正转变为红外行业的主流，并真正具有减轻光学系统重量的潜力。虽然使用替代材料（如塑胶）还不是一个太成熟的技术路径，但仍提供了一个潜在的突破方向。

小 FPA：虽然 FPA 一般只占热成像系统整体尺寸和重量的一小部分，但降低有效区域仍会成比例影响光学组件的尺寸。像素大小和像素数量这两个变量对有效区域有影响。目前， $25\text{ }\mu\text{m}$ 像素代表了

最小的普通像素尺寸, 最先进的红外焦平面设计封装低于 $20\ \mu\text{m}$ 。减少阵列格式(例如, 80×60)显然会降低视场和成像分辨率, 但重要的是解决了微型无人机比大型飞机固有的更易隐身问题。它可以飞近目标而不被发现, 这意味着虽然减少了 FPA 上的像素数, 但目标上的像素数仍可能保持不变(甚至增加)。

6 结 论

便携式无人机系统为军事和执法机构提供了巨

大的利用价值。便携式无人机系统能够迅速部署, 很少或根本不用进行场地准备工作, 只进行少量的人员培训即可使用, 而且不用暴露己方位置。他们可隐身、坚固耐用, 而且成本低廉。在完全黑暗和低能见度条件下可提供很好的成像能力, Omega™ 相机进一步扩展了微型无人机的实用性。如表 3 所示, Omega™ 相机非常适用于微型无人机系统的红外成像有效载荷。红外领域的下一个障碍是红外传感器的进一步小型化, 微型无人机需要的能提供热感应能力的有效载荷应 $<10\ \text{g}$ 。

表3 Omega™的性能

Requirement for a miniature UAV payload	Omega™ performance
Small	$<77\ \text{cm}^3$ ($4.7\ \text{in}^3$), including lens
Lightweight	$<114\ \text{g}$ ($4.0\ \text{oz}$)
Low power consumption	$<1.5\ \text{W}$
Rugged	<ul style="list-style-type: none"> • Qualified against extreme shock/vibration • Wide operating temperature range
Easily integrated	<ul style="list-style-type: none"> • Power-in/video-out operation (fully automatic) • Wide input voltage range (runs directly off vehicle battery) • Standard NTSC output channel
High sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> • $<85\ \text{mK}$ at $f/1.6$ (equivalent to $33\ \text{mK}$ at $f/1.0$) • 30 Hz frame rate
Sufficient FOV/range	Three lens options. FOV and resolution can be optimized for the mission

《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国仪器仪表学会主办。

·中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊

·现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士

·Benjamin J Eggleton, John Love等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

*美国工程索引EI核心期刊

*中国精品科技期刊

*中文核心期刊

*中国科技论文统计源核心期刊

*百种中国杰出学术期刊

本刊网址: <http://www.eope.net>, 欢迎访问! 欢迎投稿! 欢迎订阅!