

非制冷红外成像在对空制导中应用的关键问题

阎胜利, 潘洪涛, 王子辰, 吴泽鹏

(上海机电工程研究所, 上海 210001)

摘要: 随着半导体工艺的进展, 长波非制冷红外成像器件灵敏度得到长足进步, 作用距离日益提高, 应用逐步成熟, 国内外已在空地弹上应用, 但在防空弹上未见报道; 对于近程防空导弹, 由于飞行距离和时间短, 非制冷的应用条件基本满足, 但对于一些应用上的具体问题需要深入探讨和研究。从空地弹上对非制冷研究, 可以总结出非制冷在防空中应用的几个关键问题: 首先, 由于敏感的波段不一样, 因此典型空中目标、天空(地物)背景的长波目标特性对目标的远距离识别和提取有影响, 从而影响截获距离; 其次, 长波非制冷探测器的热时间常数较大, 对于机动目标的跟踪有一定的问题, 因此应用上可能有限制; 并且, 在中波段短时间飞行影响很小的头罩气动热问题在长波段可能有较大影响, 需要进一步详细研究。若可以很好地解决上述几个问题, 相信非制冷红外成像在防空导弹上的应用指日可待。文中对非制冷红外成像制导应用的几个关键问题进行了逐一分析, 作为总体牵引研究。
关键词: 非制冷红外成像; 制导; 防空导弹; 关键问题

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)08-2315-06

Key subjects of UCIR guidance applied on air defence

Yin shengli, Pan Hongtao, Wang Zichen, Wu Zepeng

(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 210001, China)

Abstract: For the recent progress in semiconductor, and the development in sensitivity of uncooled infrared imaging device, uncooled IR seeker is applied on the air- to-surface missile, but none of surface-to-air. Because of its short flying time and a nearer distance, uncooled IR seeker is used on Terminal Defence Missile. Also there are some practical points needing to be researched in deep. There are some key points on the air-to-surface like anti-aircraft. First of all, the different bands it works lead to a different target or background characteristics, affecting the acquired distance; There is a longer integration time constant of uncooled IR detector compared with the cooled, it is hard to track high maneuvering targets; Finally, the aerodynamic heating on the seeker dome will cause severe thermal radiation effect on the detection system in the aerodynamic thermal environment, because of the long-wave IR band and the long time flying. If such problem can be solved favorably, uncooled IR seeker will be applied quickly on Terminal Defence Missile, and this research will provide a reference.

Key words: uncooled infrared imaging; guidance; anti-aircraft missile; key subjects

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-01-23

基金项目: 上海航天技术研究院创新基金

作者简介: 阎胜利(1981-), 男, 博士, 主要从事光电精确制导方面的研究。Email: yshl8631@sina.com

0 引言

非制冷器件以其无需制冷、成本低的优势,在民用和军用观瞄中应用比较广泛。而且随着半导体工艺的进展,长波非制冷红外成像器件日新月异,作用距离日益提高,应用逐步成熟^[1];国外已在空地弹上应用,但作用距离近(一般在 5 km 以内),在轻型车载近程或超近程防空导弹中,非制冷红外制导的应用潜力比较大;近程防御或超近程防空导弹主要对付直升机类目标,此类目标机动性小,因此采用非制冷红外凝视成像截获目标,反应快速,无需制冷免维护,成功概率较大^[2]。目前非制冷红外成像器件已经在空地及反坦克导弹上应用,且红外成像体制在抗干扰性能上也有极大优势;因此对于防空导弹在成本、体积重量、反应时间、可靠性及抗干扰性能方面优势明显。

1 非制冷红外成像制导现状

1.1 采用非制冷红外成像导引头的现状

目前国外基于非制冷红外焦平面阵列的低成本红外成像导引头有:JDAM 改型、JASSM 改型、JSOW 改型、Paveway 改型、MKV 红外导引头,图 1 是 GBU-53 制导炸弹,采用了低成本非制冷红外成像三模复合导引头。

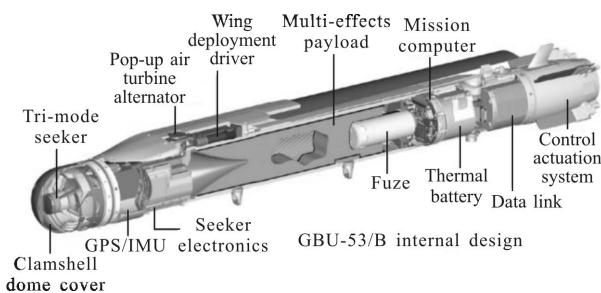


图 1 采用了非制冷红外成像制导的 GBU-53

Fig.1 GBU-53 with the uncooled IR seeker

美国 NLOS (非瞄准线) 地地导弹导引头采用 640×480 氧化碲非制冷红外成像制导,如图 2 所示。

由于国内非制冷器件水平较低,主要依赖于国外进口产品,军用非制冷一般用于单兵手持夜视、枪瞄等观测及侦查领域,非制冷在导弹上的应用也是近几年才开始论证的,主要是在空地导弹和反坦克导弹上,国内至今都处于预研论证阶段,并没有型号

列装。目前的原理样机都是应用在空对地或地对地平台,打击静止或低速运动的地面目标。在地空导弹或空空导弹上,由于满足作用距离是第一位,对成本不敏感。另外某些地空或空空导弹^[3],在探测波段选择及长时间飞行气动热考虑中波,因此没有考虑长波非制冷的方案,但在近距防空及武器需要大批量装备的情况下,非制冷优点更多,因此可以作为一个方向重点关注。

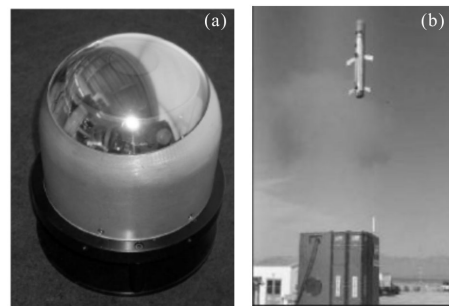


图 2 美国 NLOS 地地导弹导引头

Fig.2 American NLOS ground-to-ground missile seeker

1.2 非制冷在近程防空导弹中应用的难点

- (1) 防空导弹所攻击的战斗机在空中的长波红外目标辐射和运动特性不明确;
- (2) 非制冷红外相对于制冷器件的灵敏度低、器件响应时间长;
- (3) 非制冷红外对应的长波头罩阻力及气动热问题更严重。

2 非制冷红外在防空中应用的目标辐射特性分析^[4]

非制冷红外一般探测波长处于长波 8~12 μm ,探测的峰值温度低,对于空中目标探测其蒙皮,而对于中波探测效果好的高温尾焰则不是其较好的探测部位,从辐射强度和面积上看,目标特征发生了较大变化;由于探测器波段的不同,同样对于背景和诱饵的特征也有较大差异;对于防空导弹必须重点研究目标的蒙皮辐射以及与空气摩擦的特征。因此,首先应该分析飞机在长波段的辐射特性计算方法。

2.1 战斗机在长波段的辐射特性计算方法

和中波段相比,战斗机在长波段的辐射主要集中在蒙皮的辐射,因此分析和计算其蒙皮的辐射是首要任务。蒙皮主要热来源包括:气动热、太阳的辐

射、发动机传热和与机体的热传导。由经验知,气动加热对蒙皮温度贡献最大,因此主要考虑气动加热。采用求解数值 N-S 方程计算蒙皮气动加热比较困难且难以实现,因此,采用工程计算方法。

$$T=T_0\left(1+\frac{k-1}{2}\gamma M^2\right) \quad (1)$$

式中: T_0 为环境温度; k 为空气的比热比; M 为飞行马赫数; γ 为恢复系数。

蒙皮的红外辐射与其表面发射率和表面温度分布有关,由 Plank 辐射定律:

$$N(\lambda, T)=\varepsilon(\lambda)N_0(\lambda, T) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon(\lambda)$ 为表面光谱发射率; $N_0(\lambda, T)$ 为表面温度为 T 的黑体的光谱辐射亮度,

$$N_0(\lambda, T)=\frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (3)$$

波长在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 间的波段辐射亮度为:

$$N(\Delta\lambda)=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

红外辐射在大气传输路径上要受到衰减,LOWTRAN7 是美国空军地球物理实验室(Air Force Geophysics Laboratory, AFGL) 研制的大气传输计算软件。只要给定温度、气压、水气含量、气溶胶模型和能见距离,以及辐射波段,路径长度和类型(水平或斜程),就能得到光谱透射比、平均透射比等结果。是现今比较完善的、使用比较普遍的一个计算低光谱分辨率、透过率和辐射的软件包。

2.2 典型战斗机长波辐射特性估算

根据普朗克公式,目标的辐射光谱密度为:

$$L=\frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T)-1} \quad (5)$$

式中: $c_1=2hc^2=1.19 \times 10^8$, $c_2=\frac{hc}{k}=1.43879 \times 10^4$; L 为光谱辐射密度,单位: $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

由于典型战斗机的蒙皮温度处于 $-73 \sim +349^\circ C$ 温度范围面积大,波段较宽,使得蒙皮红外辐射强度在 $8 \sim 12 \mu m$ 波段内比较强。在对飞机进行迎头攻击时,由于发动机和尾焰全部或部分被遮挡,蒙皮辐射更是主要辐射源。长波红外图像利用飞机自身发射的长波红外辐射,因机身蒙皮有较强的辐射而得以清楚地看到整架飞机,并更多地反映了飞机的热信息。

依据 2.1 节的计算方法和估算的目标温度特性,可以估算出 F-16 的辐射强度方向图,如图 3 所

示,如果不考虑路径传输衰减等因素,可以发现长波辐射强度比较强,按照迎头 30° 方向比较,同样视角下长波辐射强度是中波的 10 倍以上。但这仅仅是在理想情况下的粗略估算,真实的探测能力需要考虑大气传输衰减及背景的综合影响。

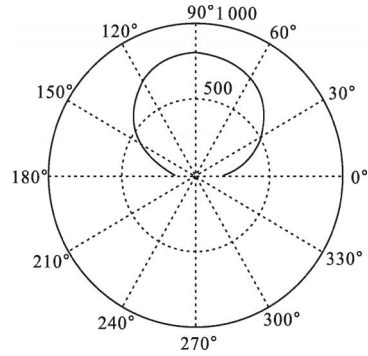


图 3 “F-16”长波红外辐射强度分布方向图

Fig.3 Long-wave IR radiation distribution of "F-16" aircraft

3 防空应用中非制冷红外探测器的性能分析^[5]

非制冷探测器一般采用氧化碲或多晶硅材料作为其敏感面,由于在常温下依靠材料的热敏效应探测,不对探测器制冷,因此其探测灵敏度较差,NETD 一般在 50 mK 以上(而制冷探测器一般在 10 mK 左右),因此探测距离上较制冷探测器差,而且由于探测器采用的敏感材料的热敏时间常数一般较长,在高速追踪目标的情况下可能会有拖尾问题,必须通过从总体上详细计算和论证,分析其探测的上下限。成本和性能往往是一对矛盾体,在红外成像制导领域也不例外,目前在 10 km 以上距离的探测识别上以中长波制冷探测器为主流,而非制冷焦平面中,目前以热敏电阻测微辐射热计为主流器件,探测率较制冷器件低一个数量级,因此仅仅适合于近距离探测,目前非制冷在 10 km 以内的侦查监控中应用广泛,在武器系统中的应用也是近几年才开始的,而且大多应用在对地末端制导。

3.1 非制冷红外器件规格对防空应用的影响

热敏电阻型探测器是目前灵敏度较高且应用广泛的器件。热敏电阻型非制冷红外探测器是利用具有较高电阻温度系数的热敏材料,在吸收红外辐射后其电阻发生变化的特性获得红外信号。该类型探测器目前较为成功的有两种,分别以氧化碲和非晶硅作为热敏材料。该类型非制冷红外探测器的显著

优点是响应率较高,可达到 103~104 V/W;其次,非制冷型红外探测器的制备工艺和目前硅集成电路的制备工艺兼容,可开发出大规模焦平面类型红外探测器,能够对飞行器进行更高精度的姿态控制,它代表了目前红外非制冷探测器的发展水平。但热敏电阻型非制冷红外探测器的制备工艺复杂,器件要求高真空封装。

国外有多个厂家生产非制冷探测器,一些典型的代表产品包括:非制冷型红外探测器面阵的典型代表是法国 ULIS 公司,其热敏材料为非晶硅,美国 DRS 公司研制的系列产品,如图 4 所示,热敏材料采用了氧化碲,其阵列规模也为 320×240、640×480 等。目前非晶硅的热响应时间常数为 7 ms 左右,而氧化碲一般在 10 ms 左右,探测器输出图像的帧频最高为 50 Hz。

从上面主流探测器的探测器规格可以看出:

(1) 探测器的像元规模可以很容易做到 320 或 640,因此在防空应用上可以发挥优势,结合制导控制一体化做成捷联非制冷体制;

(2) 非制冷红外探测器的热时间常数较长,导致非制冷探测器的帧频不能太高,因此限制了防空导弹追踪高速目标的应用。

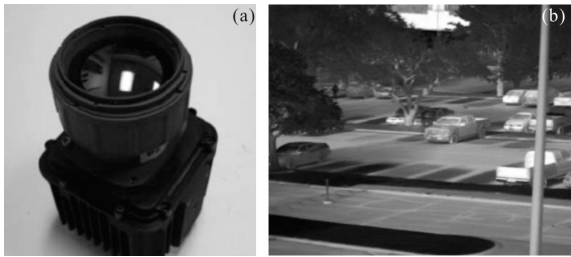


图 4 DRS 公司的 17 μm 1 024×768 非制冷红外探测器及其成像质量

Fig.4 17 μm 1 024×768 uncooled IR detector of DRS and its imaging performance

3.2 非制冷器件灵敏度对防空应用的影响

一般在防空导弹红外导引头的评价体系中,对点目标探测系统通常用噪声等效辐照度 (NEFD) 来计算作用距离,红外系统的探测距离应考虑系统的灵敏度,以及在视场内目标与背景的辐射对比度,背景辐(反)射的时间、空间分布规律等。

基本计算的公式如下。

背景辐射亮度:

$$L_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon c_1}{\pi \lambda \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_b}} - 1 \right)} d\lambda \quad (6)$$

凝视成像系统的时间噪声等效辐照度:

$$\text{NEFD}_t = \frac{4 \sqrt{A_d \Delta f_n}}{\pi \tau_0 D_o^2 D^*} \quad (7)$$

凝视成像系统的空间噪声等效辐照度:

$$\text{NEFD}_s = u \xi \alpha \beta L_b \quad (8)$$

凝视成像系统总的噪声等效辐照度:

$$\text{NEFD} = \sqrt{\text{NEFD}_t^2 + \text{NEFD}_s^2} \quad (9)$$

最终得出作用距离:

$$L^2 = \frac{\delta \cdot \tau_a \cdot J}{\text{NEFD} \cdot (s/n)} \quad (10)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为探测器截止波长上下限; δ 为信号率值因素; τ_a 为光学透过率; τ_n 为大气透过率; D^* 为探测器探测度; D_o 为光学接收系统; J 为目标辐射强度; A_d 为探测元光敏面积; Δf (Hz) 为系统带宽; s/n 为信噪比; T_b 为背景温度; ε 为背景发射率; u 为空间不均匀性; ξ 为探测器填充系数; α 、 β 为成像器水平垂直瞬时视场,考虑非均匀性影响的作用距离,给定典型的非制冷红外系统参数,可以推算出理论作用距离能够达到近程末端防御的射程要求。

从上述分析可以看出,在防空上应用时一般采用的是噪声等效辐照度 (NEFD) 指标体系来衡量作用距离,几乎不考虑背景的影响,而处于长波探测波段的非制冷应用,背景比较复杂,需要采用噪声等效温差 NETD 的衡量体系。

目前主流非制冷器件的噪声等效温差在 50 mK ($F=1$),而制冷器件可以达到 10 mK 以内,因此非制冷探测器的低灵敏度会给防空中应用带来一些影响:

(1) 长波非制冷对空中目标的探测,由于长波探测温度低,云或少数地物背景会较多出现在视场中,背景需要重点考虑,而且非制冷红外成像的细节已经比较丰富,单纯目标的辐射强度不适用于评价导引头性能,需要采用温差探测与分辨的体系来衡量防空导弹导引头的截获性能;

(2) 器件的灵敏度低直接影响探测距离,会导致防空导弹稳定截获目标的距离比较近,单一非制冷红外体制可能难以满足远距离截获要求;

(3) 由于同时为了尽量增加探测距离需要扩大通光口径,会导致防空导弹导引头头部变钝,增大了

头部阻力,同时会增大头部温度。

4 非制冷头罩气动热对防空应用的影响

近程末端防空导弹飞行速度一般都超过音速,飞行时间较短,非制冷探测器由于灵敏度低,在远距离探测低温目标时需要使用较大的通光口径,因此头部阻力变大、气动热更严重。另外,气动热也会通过壳体和隔热材料向内部传递,从而使内部电子器件产生电性能漂移、电路失稳或失效,甚至影响导弹探测器正常成像;同时头罩承载着一定的气动压力,可能引起头罩的局部变形,也将影响到探测器的成像质量,最终影响导弹的命中精度和导引头的作用距离。

4.1 非制冷导引头头罩可选的材料

头罩的材料要考虑透红外、耐高温、耐腐蚀的材料,目前可供选择的加工光学材料有金刚石、GaP、ZnS、Ge、CaLa₂S₄、ZnSe等,由于天然的金金刚石价值昂贵,并且人造金刚石的尺寸不能满足要求;GaP是一种很好的导引头光学材料的制作材料,但是该材料距离工程实用化还相差较远。Ge是良好的红外材料,但该材料在工作温度高于70℃后,其透过率显著降低,因而难以用作高速拦截器光学头罩的红外窗口材料。ZnS和ZnSe相比,光学特性近似,但是ZnS的机械性能优于ZnSe的机械性能,通过将上述红外材料的特性以及机械加工的难易程度进行比较,一般在实际加工中选择ZnS做红外光学窗口材料。ZnS材料属于光学晶体,目前大尺寸、均匀性好的ZnS材料制作较为困难,ZnS材料的制作通常采用物理气相沉积,化学气相沉积,粉末热压成型等制作方法。

4.2 非制冷红外导引头头罩温度的控制

4.2.1 匀速飞行的温度场分析

对导弹加速、匀速飞行进行仿真,可以得出结论:舱内空气温度很高,加速阶段 T 为397~648 K,匀速阶段 T 为544~724 K。根据Wein位移定律,物体的最大辐射波长 λ 与 T 成反比,可表示为: $\lambda T=289 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。某弹探测的波长大约在8~12 μm 范围内,由Wein位移定律可知:物体的辐射温度为242~362 K,整流罩温度经历了293~777 K,基本上覆盖了物体的辐射温度范围,即该弹在飞行过程中,整流罩会产生8~10 μm 波长的辐射,显然会对导引头产生干扰。同时可算出,整流罩经历的温度会辐射出4~10 μm 的红外线,

这个波段对导引头为铋化铟(2~6 μm)、硅化铂(0.8~5 μm)或碲镉汞(1~24 μm)的组件都会产生影响。可见,要消除影响必须采取措施控制整流罩的温度。

另外,非制冷红外探测器的积分时间较长,因此首先从探测器饱和的角度进行理论推算,可以得出某探测器的头罩温度应该低于400 K,探测器才能清晰成像。通过实验,也可证明头罩温度控制在400 K以下时,探测器才不发生饱和。

4.2.2 自由加速飞行的温度场

当速度在音速以内时,气动加热对导引头头罩的影响很小,但防空导弹在高速飞行时气动加热影响较大,高速飞行的导弹,弹体表面最高温度一般在750 K左右;当 Ma 超过3,气动热效应更为明显。对头罩表面气动热载荷加载进行建模计算可以发现,超音速导弹在很短的加速飞行就可使整流罩外表面最高温度达到700 K,且温度分布并不均匀,顶点温度不如其他部位高,头罩表面温度比内部高得多。对近程末端防御导弹的飞行速度和时间进行分析,可以仿真得出头罩实际温度可能已高于400 K,因此必须采取措施来抑制热障,否则探测器无法正常工作。

4.2.3 头罩降温的工艺措施

光学侧窗头罩制冷窗口加工工艺的特别之处在于其既具有光学特性,还具备冷却功能,因而加工的难度较大。通常,硫化锌材料制作的光学零件主要用于透红外光线的产品中,而光学侧窗头罩制冷窗口不仅要能够透红外光线,还要使冷却液能顺畅通过光学零件中的冷却槽,实现自冷却,满足其在高速飞行中的使用条件。为了满足使用要求,需要对常规的光学加工工艺进行改进,因此在实际工作中,技术人员和加工人员采用机械加工、光学加工、物理、化学等多种工艺方法,完成光学侧窗头罩制冷窗口研制任务,达到设计要求的各项光学性能指标。

从上面看出,非制冷红外导引头头罩气动热问题突出,在某些方面可能会限制防空导弹性能的发挥:

(1) 防空导弹红外非制冷头罩的可选择范围很小,头罩气动热问题比较突出,可能需要选择新兴的头罩材料,并对头罩的温度进行适当的控制。

(2) 为了减小气动热,非制冷导引头的防空导弹头部曲线可能比较特殊,必须结合导弹总体的气动计算、结构外形设计、弹道设计,开展一些风动实验、外场拉距探测实验、跟飞实验,优化设计导弹的速

度、气动力、头罩外形及导引头总体指标,最终为导引头的探测识别优化出一个较好的总体指标;

(3) 非制冷气动热引起的噪声会出现在非制冷热像上,除了硬件上的抑制,图像信息处理上也需要采取一些去噪或非均匀性校正措施来改善图像质量,提高图像信噪比,有助于截获目标。

5 结 论

由于非制冷红外成像技术在近距离探测上有比较大的优势,特别适合于这种要求低成本、一次性使用的场合,各国在近程制导上的研究都在开展,而且研制随着工艺和器件材料的进步,近几年国外的非制冷器件探测距离也在逐年提高,在防空上的应用指日可待。文中对防空导弹应用中的长波目标特性、探测灵敏度以及头罩问题进行了分析。可以发现解决头罩的气动热问题以及提升探测器的性能是工程应用的关键,主要依靠导引头头罩和探测器关键工艺的突破,但同时弹总体在外形、导引头跟踪指标及飞行速度上要进行优化设计,共同协调努力。通过分析和梳理,作为对分系统研制的牵引,促进非制冷红外在末端防御导弹上的应用。

参考文献:

- [1] Zhai Houming, Chen Yongping, Ma Bin. Application of uncooled infrared detector in application spaces copes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 38(5): 110-115. (in Chinese)
翟厚明, 陈永平, 马斌. 非制冷红外探测器在航天领域中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 38(5): 110-115.
- [2] Wang Yanxin, Liu Qi, Li Zhaoyi, et al. Analysis on several issues of infrared imaging guided technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 38(5): 135-140. (in Chinese)
王延新, 刘琪, 李兆熠, 等. 红外成像导引技术应用中若干问题的分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 38(5): 135-140.
- [3] Wang Xingtao, Zhang Jingzhou, Shan Yong. Numerical investigation of aircraft infrared characteristics in 8-14 μm band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 42(7): 1134-1140. (in Chinese)
王杏涛, 张靖周, 单勇. 飞行器 8-14 μm 波段红外特征的数值研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 42(7): 1134-1140.
- [4] Yin Shengli, Zhang Yue, Zhang Xin, et al. Improving guidance message extraction of uncooled infrared imaging seeker using phase matching method [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 76-80. (in Chinese)
阎胜利, 张跃, 张鑫, 等. 相位匹配法用于提高非制冷全捷联导引头制导信息精度[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(1): 76-80.
- [5] Li Chuan, George D Skidmore, Han C J. Uncooled infrared sensor development trends and challenges [C]//SPIE, 2010, 8155: 815515-1.