

文章编号:1001-5078(2014)09-1003-04

· 红外材料与器件 ·

红外焦平面探测器快速启动影响因素分析

刘泽巍, 张 钢, 赵建忠
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:采用红外焦平面探测器制导的近程导弹武器系统对响应时间有严格要求。本文从红外焦平面探测器的启动过程分析入手,对影响探测器启动时间的要素进行了分析。给定应用的情况下,合理的冷屏设计和快速制冷是解决红外探测器快速启动的关键。

关键词:红外焦平面;快速启动;冷屏;J-T 制冷器

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.09.011

Analysis of influence factors on IRFPA's fast start-up

LIU Ze-wei, ZHANG Gang, ZHAO Jian-zhong
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Response time is a key factor to weapon system of short-range missiles guided by IRFPAs. Starting from the analysis of IRFPA's start-up process, the influence factors of the start-up time were analyzed. For given applications, reasonable design of cold shield and fast cooling are the key factors to solve fast start-up IRFPAs.

Key words: IRFPA; fast start-up; cold shield; J-T cooler

1 引 言

红外制导导弹具有制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、性价比高、结构紧凑、机动灵活等优点,军事上应用广泛。红外探测器作为制导的核心元件,规格目前以线列和面阵型为主,其中探测器芯片由光敏芯片和读出电路互连构成,单元器件正逐渐淡出。

低空近程红外制导导弹系统主要用于随行防空和阵地防空,能够有效打击低空、超低空来袭的目标。由于从发现来袭目标到实施打击,导弹仅有很短的反应时间,这就要求红外探测器具有快速启动的能力,本文就影响红外焦平面探测器快速启动的因素进行初步的探讨。

2 红外焦平面探测器的启动时间

弹用红外焦平面探测器通常采用制冷型,由探测器芯片(含读出电路)、杜瓦、制冷器、内置光学件(滤光片、场镜和冷屏等)构成^[1]。光敏芯片与读出电路互连后封装在杜瓦中,由制冷器将混成芯片冷

却到温。内置光学件保证了光敏芯片能够接收尽可能大的有效红外辐射,达到最大探测率,发挥探测器的最佳性能,如图1所示。图2是SCD公司一款快速启动红外探测器产品。

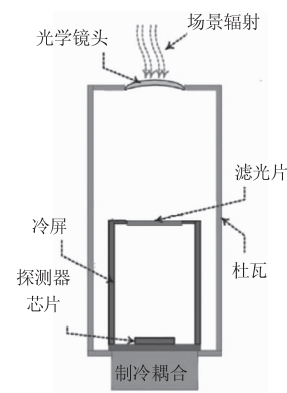


图1 红外探测器结构示意图

作者简介:刘泽巍(1982-),男,硕士研究生,研究方向为红外焦平面探测器设计,读出电路设计。E-mail:lzw_013@163.com
收稿日期:2014-02-26



图2 SCD公司快启动红外探测器

光敏芯片感应的红外辐射需经读出电路转换为电信号输出到后端处理电路。读出电路信号传输通路大体可分为三个部分:像素单元、列级和输出级。探测器接收红外辐射产生光生电流,一定的积分时间内,该电流在像素单元内积分成电荷或电压存储在积分电容 C_{int} 内,然后转移到列级,经输出级串行输出,图3是像素单元采用直接注入型的读出电路的简单示意图^[2]。

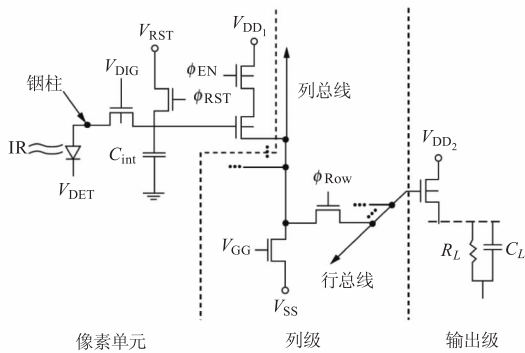


图3 直接注入型读出电路基本结构

每次积分存储的电荷 Q_s 可以表示为:

$$Q_s = I_s \cdot t = C_{int} \cdot V$$

其中, I_s 是积分电流; t 是积分时间; C_{int} 是积分电容值; V 是积分电压。由于积分电容要与探测器应用匹配,且像素单元内面积有限,往往电容值不能设计很大。 V 最大不能超过读出电路电源,因而积分电荷存在一个最大值。把积分电容理解为一个势阱的话,当光生电流积分的电荷超过这个最大值时,积分电容就会饱和。饱和状态下,探测器无法探测辐射大小。

制冷型探测器常温时相当于导体,积分电流很大,积分电容容易饱和。由常温制冷到低温工作条件的过程,多种辐射效应叠加。随着降温过程,这些辐射效应作用逐渐减弱,积分电流逐渐减小趋近探测目标产生的光电流。探测器输出由饱和向正常工作状态转变,达到可探测条件需要一定时间,这个时

间即探测器的启动时间。启动时间是考核应用于近程导弹探测器的一项重要指标,它基本决定了近程导弹的反应时间。

3 影响红外焦平面探测器快速启动的关键因素

光伏探测器光敏元接收辐射后产生电流,该电流可以表示为:

$$I_s = \eta \phi_s q A$$

其中, η 为光电流转换效率; ϕ_s 为辐射强度; q 为电子电荷数; A 为光敏面面积。

探测器除了接收来自探测目标的辐射之外,同时也接收背景辐射,这些辐射也对光生电流有贡献。根据系统探测对视场的要求,在探测器内部通常设置有光阑,用于限制杂散光的干扰和降低背景噪声。冷屏通常与光阑一体,能够将环境温度的背景辐射降低到冷屏温度的背景辐射,降低探测器噪声,提高探测率,如图4所示。

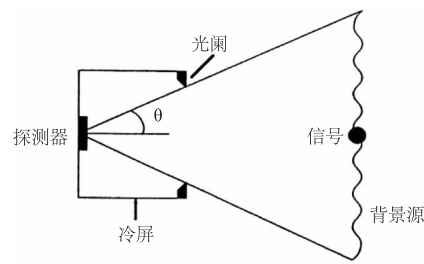


图4 光阑和冷屏示意图

设置光阑后,探测器启动过程中“看到”的是场景辐射、一部分外壳对内部辐射、冷屏的辐射和经冷屏的反射,如图5所示^[3]。

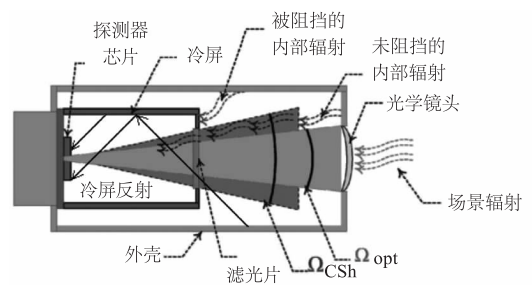


图5 辐射示意图

所以启动时积分电流也可表示为各部分辐射之和:

$$I_s = \eta (\phi_{scene} + \phi_{internal} + \phi_{cs} + \phi_{re}) q A$$

其中, ϕ_{scene} 为场景辐射; $\phi_{internal}$ 为冷屏未阻挡的内部辐射; ϕ_{cs} 为冷屏辐射; ϕ_{re} 为冷屏反射。场景辐射 ϕ_{scene} 相对固定,外壳内部辐射、冷屏辐射和反射与制冷温度和视场角有关。在探测器启动的过程中,芯片最接近冷源,降温最快。外壳和冷屏温度随着探测器制冷温度降低,但温度较芯片依然很高。此

时背景辐射、内部辐射和冷屏辐射和反射的共同作用,积分电流很大,探测器输出依然饱和。当外壳和冷屏制冷到温后,探测器输出才能满足探测要求,即为启动。对于应用环境极为恶劣的热带地区温度达到 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加上太阳辐射,周围温度将超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, ϕ_{internal} , ϕ_{cs} 和 ϕ_{re} 的辐射能量在启动过程中的影响增加,启动时间也将延长。

因此,探测器启动快慢与冷屏设计和降温速度关系密切,而降温速度与制冷有关。

3.1 冷屏设计

为了降低 ϕ_{internal} , ϕ_{cs} 和 ϕ_{re} 对信号的影响,需要针对各项作用采取优化设计。首先,光阑孔尺寸决定了视场角的大小,也就决定了有多少 ϕ_{internal} 和 ϕ_{re} 被探测器接收到。因此在设计时,应保证光学镜头视场角 Ω_{opt} 大于或等于冷屏视场角 Ω_{CSh} , 这样 ϕ_{internal} 就无法辐射到芯片, ϕ_{re} 也会相应减小,积分电流为:

$$I'_s = \eta(\phi_{\text{scene}} + \phi'_{\text{cs}} + \phi'_{\text{re}})qA$$

其中, $\phi'_{\text{re}} < \phi_{\text{re}}$ 。试验发现,以理论计算得到的光阑孔尺寸为依据,分别设计尺寸大于理论值、等于理论值和小于理论值的冷屏,装配到同一探测器对比启动时间。装配大于理论值的冷屏后探测器启动时间明显长于另外两个,相差约 $2 \sim 3\text{ s}$ 。虽然更小的光阑孔尺寸可以缩短启动时间,但也要考虑目标信号的接收。

其次,冷屏的材料应选取低吸收和高反射率的铜、镍钴合金、金等材料,制作轻薄,热传导快,降低冷屏自身吸收和辐射能量,这样设计后 ϕ_{re} 减小为 ϕ'_{re} , 积分电流为:

$$I'_s = \eta(\phi_{\text{scene}} + \phi'_{\text{cs}} + \phi'_{\text{re}})qA$$

其中, $\phi'_{\text{cs}} < \phi_{\text{cs}}$ 。

再者,外壳内部辐射通过光阑孔经冷屏内壁反射可通过发黑处理,提高表面粗糙度,增加内壁反射角,进一步降低 ϕ'_{re} 的影响至 ϕ''_{re} , 这样设计后积分电流为:

$$I'_s = \eta(\phi_{\text{scene}} + \phi'_{\text{cs}} + \phi''_{\text{re}})qA$$

其中, $\phi''_{\text{re}} < \phi'_{\text{re}}$ 。试验发现,与没有发黑处理的冷屏对比,发黑之后启动时间缩短 $1 \sim 2\text{ s}$ 。

以上优化可设计出类似图 6 所示的冷屏结构,使得背景辐射在较短时间内降低到相比目标辐射远小得多的量级,达到缩短启动时间的目的。对于应用环境温度较高的情况下,启动时间改善尤为明显,整体可缩短 5 s 左右。

3.2 制冷设计

弹用制冷器需要适应弹体设计 and 应用条件,而

制冷方式、制冷气体和气源压力是制冷器设计的三个基本要素,因而需要根据对目标快速响应的要求确定三个要素的选择。



图6 冷屏结构体

3.2.1 制冷方式的选择

红外探测器制冷方式主要有三种方式,斯特林制冷、热电半导体制冷和 J-T 节流制冷。对于快速制冷的要求,斯特林制冷和热电半导体制冷都不适用。它们虽然能提供稳定的制冷输出,但启动时间长,且产生大量热,很难在导引头中消散。弹用红外探测器组件多采用 J-T 节流制冷器,根据启动时间可分为两类:一类是采用自调方式,启动时间相对较长,应用于空空导弹上,如空空导弹的典型代表美国 AIM-9 系列启动时间在 60 s 左右;另一类要求发现目标后快速响应,启动时间在 3 s 左右,称之为快速启动制冷器,目前快速制冷器有喷射式和平板式两种。

喷射式和平板式快速启动制冷器都是带有预冷级的节流制冷器。主要特点^[4]: (1) 易于实现探测器组件结构微型化及低热质设计,适用于动力陀螺位标器; (2) 可提供较快的制冷速度; (3) 无机械振动、无电磁干扰、可靠性高。区别在于喷射式较平板式启动时间更短,制冷后气体滞留对位标器温冲较大,耗气量大,蓄冷时间短。

3.2.2 制冷气体

J-T 节流制冷器是利用气体等焓节流产生温度变化,不同的气体降温速度和终点温度有所差异,需要折中选择。图 7 对比了氩气、四氟化碳、氦气和甲烷 4 种气体在同一容积的气瓶内由室温降至沸点的降温过程^[5]。由图中可以看出,甲烷的降温速度最快,其次是四氟化碳和氦气,但这三种气体的最低温度不低于 120 K , 无法满足一般制冷型探测器要求的 $90 \sim 100\text{ K}$ 的温度要求。而氩气虽然起始降温速度慢,但温度能够达到 100 K 以下,可以满足单气路探测器要求,因而快速启动制冷器多用氩气作为

制冷介质。

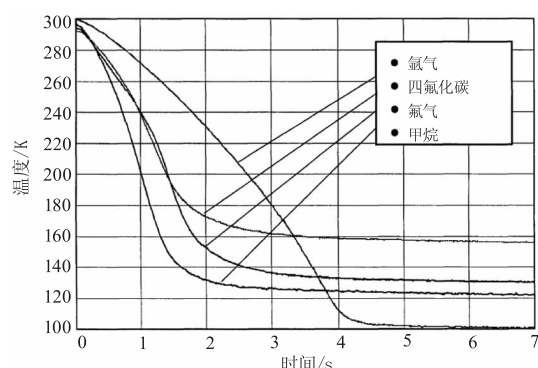


图7 不同制冷气体降温比较

为了提高启动速度,受图7启发,一种两级双工质J-T制冷器设计被提了出来^[5]。制冷器第一级采用沸点较高但降温较快的气体,如甲烷或四氟化碳,降温至120 K或160 K,第二级采用沸点较低的氦气或者氟气,进一步降温至所需的90 K或77 K。

3.2.3 气源压力

弹用制冷器由弹上气瓶提供气源,气瓶的初始压力通常较大,以保证制冷器快速启动需求。实验表明,当制冷器设计和制作工艺固定后,气源压力存在一个最佳值^[6]。压力低于最佳压力时,提高供气压力可以缩短启动时间,供气压力高于最佳压力时,不但对启动时间没有贡献,制冷效率反而降低。通常应用条件下氦气压力不高于44 MPa,氮气不高于35 MPa,但制冷器的最佳使用压力与设计有关。法国SOFRADIR公司制造的AQUILA 384×288中波红外探测器组件采用50 MPa氦气,常温启动时间小于7s。

4 结论

通过上述分析,在红外焦平面探测器快速启动设计时可考虑以下几点:

- (1)合理设计冷屏形状、光阑孔尺寸,优化视场角,减少背景辐射;
- (2)合理选择冷屏材料,降低自身辐射,加快热传导;
- (3)选用J-T制冷方式,采用降温速度快的单工质或双工质制冷;

(4)选取合适的启动压力,提高制冷量。

本文仅对影响红外焦平面探测器快速启动的冷屏设计和制冷进行了简单分析,与探测器研制相关的环境适应性、可靠性等未深入展开。弹用快速启动红外探测器性能要求高,需求量较大,研制目标就是在体积紧凑、小质量、低功耗等要求之间寻求最大可能的折中平衡,实现具有足够制冷量、低维护要求、长寿命、低成本以及抗电磁辐射等武器系统目标。经过多年的技术积累和攻关,多款红外探测器常温启动时间达到3 s,高温条件下,启动时间小于5 s。随着导弹智能化,红外探测器将采用功能更为复杂的面阵形式,以提高分辨率和增强功能,结构复杂化、热负载的增加、制冷需求的提高,使得快速启动设计的难度也将进一步提高。

参考文献:

- [1] SUN Weiguo, HUANG Yongan, et al. Air to air missiles photodetector design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
孙维国, 黄永安, 等. 空空导弹光电探测器设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] Lester J. Kozlowski, Walter F. Kosonocky. Handbook of optics [M]. New York: McGRAW-HILL, INC, 1995.
- [3] Saar Bobrov, Yoav Y. Schechner. Image-based prediction of imaging and vision performance [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(7): 1920 - 1929.
- [4] LÜ Changshui. Development situation and tendency of the fast-cool-down joule-thomson cryocoolers used for IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36: 521 - 525. (in Chinese)
吕长水. 快速J-T效应制冷器研发概况与趋势[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增): 521 - 525.
- [5] Uwe Hingst. Fast cool-down dual gas spray-cooler for pivoted IR-detectors [J]. SPIE, 2003, 5074: 620 - 629.
- [6] MA Yanhong. Factors influencing the starting time of self-adjusting J-T cooler [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(3): 258 - 260. (in Chinese)
马艳红. 影响自调式J-T制冷器启动时间的因素[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 258 - 260.