

天基动能拦截器技术

汪洋* 郑亲波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

天基动能拦截器 (SBI, Space Based Kinetic Interceptor) 是一种超级精确而轻小的智能型拦截武器, 是有效的天基安全与防卫装备。它部署在 500km 左右的高空, 根据指令, 飞行到目标的轨道上。启动拦截器上的探测器工作, 将目标成像在视场中心, 跟踪目标并进行真假目标识别。以相对于目标高速飞行的动能, 通过直接碰撞杀伤摧毁目标。天基动能拦截器是从美国 SDI (战略防御倡议) 计划“智能卵石”概念发展而来的, 是用于反卫星的典型武器, 也可以用于弹道导弹的拦截。SDI 的“智能卵石计划”实际上包括轨道上配置的小卫星和地面部署的导弹, 它利用其动能跟踪和撞击敌人的卫星或导弹, 因此又称为“动能拦截器”或“拦截卫星”。

天基动能拦截器具有卫星的特征和结构, 包括星体、电源、星务、通信、遥测等基本组成部分, 可列于微小卫星 (MicroSatellite) 系列, 其有效载荷是动能拦截器 (简称 KKV [Kinetic Kill Vehicle])。

1 组成

一个典型的动能拦截器主要由以下几部分组成:

1.1 探测器 (或称寻的头)

探测器是由红外和可见光等寻的头组成, 其功能是对目标成像, 进行目标探测

与跟踪。拦截器的微型光电成像遥感仪采用凝视成像原理制作。凝视成像具有功耗低, 重量轻, 无运动部件, 可靠性高等优点。该焦平面阵列采用光伏 (photovoltaic) 技术, 光伏型红外探测器比光导型红外探测器更适用于天基动能拦截器。光伏红外探测器可在零偏置下操作, 消耗功率比光导红外探测器要小得多。

1.2 信息处理系统

信息处理系统是实现拦截器智能化的核心, 是当前精确制导飞行器的关键技术之一。其主要功能是进行目标信息获取、数据处理与目标识别与跟踪。探测器可为拦截器获取和提供目标及其所处背景信息, 而这些信息的利用率则取决于拦截器的信息处理系统和所采用的处理技术。拦截器的信息处理能力与质量直接影响着拦截器探测目标的分辨率和在复杂作战环境中的抗干扰能力以及对目标的命中精度。它包括信息处理的硬件平台和智能算法软件, 硬件平台的每一部分将由相应的算法配合, 以实现拦截器的真假目标识别和目标跟踪的功能。

1.3 惯性导航组合

它包括激光和光纤陀螺、加速度表等, 其功能是在惯性坐标系中进行测量, 给出拦截器位置、姿态, 并进行制导。

1.4 推进系统

它包括姿态控制系统和轨道控制系统

* 98 级硕士研究生

两部分,此部分由发动机、氧化剂与燃料箱、高压气瓶、活门阀门等组成,其功能是根据控制指令产生质心位移及姿态控制。

2 特征

动能拦截器有以下几个特征:

(1) 直接碰撞目标: KKV 与以前反卫星武器相比的最大特点是不带战斗部和引信触发系统。它不是靠战斗部引爆后产生的碎片或链条来杀伤目标,而是利用与目标接近时产生的巨大动能来摧毁目标。因此,其有效载荷要小得多。为增加直接碰撞的概率,可在 KKV 上加辅助杀伤装置,例如撑出伞状物以增大拦截面积。要实现直接碰撞,关键是精确制导的精度要十分高。正是由于 KKV 不使用战斗部,大大减小了它的有效载荷。

(2) 自主寻的功能: KKV 采用红外、可见光和紫外等探测器,进行被动式探测与跟踪,同时拦截器上的惯导组合能够提供拦截器自身的位置与姿态信息,建立基准坐标,再由控制系统解算出控制指令,能够自动进行目标的探测与跟踪,并杀伤目标。

(3) 智能化信息处理: 拦截器上的高性能处理机,能对目标进行自动检测、截获、跟踪等复杂的实时信息处理,尤其是能自动进行真假目标识别。智能化是 KKV 今后的主要发展方向之一,美国考虑超前研究发展智能化的第四代 KKV 技术就是一个最明显的例证。

(4) 推力矢量控制: 拦截器的轨道控制发动机推力线通过拦截器质心位置,能进行推力矢量控制。一般采用双组元轨控发动机,国外比冲高达 285 s,发动机推质比达 1200:1,所以很容易使拦截器的轨控发动机具有大的稳态推力,以减少最终脱

靶误差,提高精度。

(5) 拦截器结构上的高度集成: 为使拦截器能实现直接碰撞,小型、轻质、灵巧显得尤为重要,这给拦截器的结构设计提出了相当高的要求。美国的 LEAP 拦截器结构上高度集成,是 SDI 重视研究系统工程与集成技术的结果,该技术为 KKV 在微型化方面取得突破性进展奠定了基础。

3 关键技术

动能拦截器包含五种关键技术: 总体设计技术、微型成像探测技术、微型高速信号处理与融合技术、高精度制导与控制技术以及高效推进技术。

3.1 总体设计技术

休斯公司的拦截器方案为: 拦截器星体的总体设计拟采用模块化设计方案,模块化设计易于组装和集成,也便于以后采用先进的技术。图 1 所示为休斯公司动能拦截器样机图。

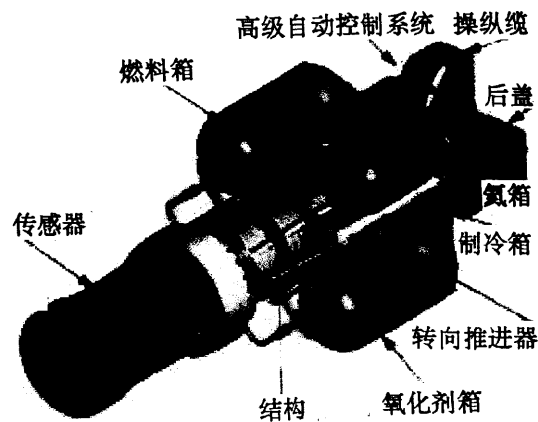


图 1 休斯公司拦截器样机图

拦截器有效载荷采用三个模块。前模块为凝视成像模块,即导引头,包括成像探测组件、信号处理组件。成像探测组件包括红外焦平面探测器以及 Si CCD 可见光探测器、光学系统、驱动与控制时序、读

出多路转换等。整个凝视成像模块将形成两个红外通道和一个可见光通道，每个通道有自己的光学系统、驱动与控制时序、读出多路转换等。

信号处理组件是实现天基动能拦截器智能化的核心组件。包括信号处理硬件平台和智能算法软件。硬件平台按功能层次划分，包括：前置放大、量化校正、信号预处理和融合处理。其中，融合处理包括像素级融合处理、特征级融合处理和决策级融合处理。每一部分将由相应的算法配合，以实现拦截器的真假目标识别和目标跟踪的功能。信号处理组件以目前最为成熟的大规模集成电路和高速数字微处理器为核心，构成多主并行的处理结构。

中模块包括惯性测量单元、推进剂和姿态与轨道控制发动机，惯性测量装置需要 GPS 补充，以减小所需的探测距离，增大拦截器的实际拦截距离。每个拦截器上有 4 个较大的轨道控制和多个比较小的双组元推进剂姿态控制发动机。

后模块包括储箱和遥测设备。

3.2 微型成像探测技术

天基动能拦截器微型光电成像遥感仪采用凝视成像原理制作。凝视成像具有功耗低、重量轻、无运动部件、可靠性大幅

提高等优点。

该焦平面阵列采用光伏型红外探测器，这种探测器比光导型红外探测器更适用于天基动能拦截器。这两种类型的红外探测器都要求低温制冷到 77K，但光伏红外探测器消耗功率比光导红外探测器要小得多。因此，光伏红外探测器制冷速度快。

探测器选择

根据所选择的波段，红外探测器采用 256×256 的 HgCdTe 焦平面探测器，可见光波段采用 Si CCD 探测器。

制冷方案

为减少体积和重量，制冷系统拟采用单级液氮、焦耳-汤姆逊低温制冷器作为焦平面的制冷机。为减少探测器接收到的光学系统的辐射，采用冷屏蔽，长焦距。

光学系统方案

成像光学系统拟采用三反射镜消像散望远镜的红外成像仪。其中，红外波段采用两个红外焦平面阵列探测器通道，可见光波段采用 Si CCD 焦平面阵列探测器通道。

如图 2 所示，当光进入第一个分光镜的时候，其部分能量被反射到一个硅 CCD 焦平面阵列上，另一部分光透过。通过去

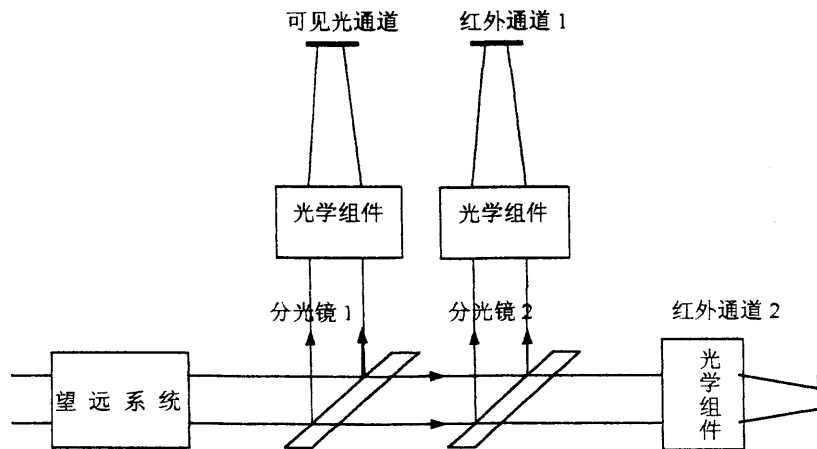


图 2 成像光学系统图

的光随后再通过第二个分光镜,其部分能量被反射到一个焦平面阵列上,其余的光继续透过,最后落到第二个焦平面阵列上。每一部分反射光的波段都比透射光的长。

3.3 信号处理与融合技术

信号处理和融合技术是当前精确制导飞行器的关键技术之一。拦截器的信号处理和融合的能力与质量直接影响着拦截器探测目标的分辨率和在复杂作战环境中的抗干扰能力以及对目标的命中精度。

拦截器的信号处理是用来从探测器所接收的信号中截取制导所需的有关信息的技术。处理过程包括:硬件处理和软件算法。

硬件处理包括:前置放大、量化校正、信号的预处理、信号的融合处理等。

来自目标的外界辐射通过望远光学系

统后,分别经过可见光学系统、红外光学系统被成像在面阵探测器上,然后被面阵探测器转换成电信号。由读出电路读出后,经前置放大处理,进入量化和校正处理。信号的量化是把模拟信号经 A/D 转换为数字信号,再进行非均匀性校正。经过信号的预处理,再把三个通道的数据送入一个融合处理通道进行融合处理。

这种系统的特点是由三个单独的敏感器对目标成像,但是每一个敏感器在同一时间看到的是同一物体,不同的仅仅是波段和带宽。这就消除了在不同的时间以不同的波段对目标成像时可能出现的数据相关的问题。每个焦平面阵列有自己独立的电子设备和信号处理信道,供冗余使用,但是三个信道都馈入一个融合处理系统。

信号软件算法分为 4 个阶段,如图 3 所示。

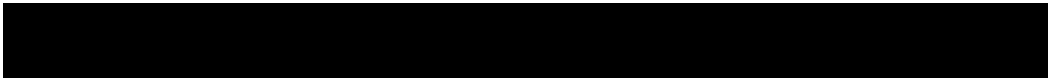


图 3 信号融合处理算法阶段转换图

对象的检测和跟踪是为识别目标增加有用信息,当选中目标之后,寻的阶段开始,此时把目标质心提供给制导系统。当目标图象大于某个设定的阈值,识别出具体目标时,进入瞄准阶段,把杀伤点提供给制导系统。

3.4 高精度制导与控制技术以及高效推进技术

高精度制导与控制技术以及高效推进技术是动能拦截器实现目标跟踪和杀伤目标的关键技术。其功能是提供拦截器在基准坐标(如惯性坐标)中的位置和姿态信息,进行跟踪和制导,并根据控制指令控制拦截器质心改变和姿态控制。包括惯性测量与制导单元、姿态与轨道控制发动机

以及进行轨控和姿态控制的推进剂等。

惯性测量单元通常采用新型的激光和光纤陀螺、加速度计等,其功能是在惯性坐标系中进行测量给出拦截器位置、姿态等信息。推进系统包括姿态控制系统和轨道控制系统,主要由发动机、氧化剂与燃料、高压气瓶、阀门等组成,其功能是根据控制指令产生质心位移及姿态控制。如美国提出的一种 16 kg 级的拦截器,就是采用了光纤陀螺和微型机械式加速度计的惯性制导装置(IMU),超小型的固体推进或液体推进系统以及采用冷气喷气方式推进系统和姿态控制推力器。

发展微型化和智能化的动能拦截器,

就要求发展微型化、高性能的分系统和部件,改进控制技术,提高制导和控制的精度和增加变轨能力等。如发展新的光纤陀螺和环形激光陀螺,这种陀螺能快速地从待机状态转入精确的工作状态,而且其尺寸很精巧;研究新的制导与控制方案,以适应发展灵巧的微型拦截器的需要。新技术还包括:减小时间常数和提高变轨能力的非线性控制技术;成本低、质量轻、精巧、准确的惯性测量装置技术;目标识别技术;精密跟踪和预测技术;小型可控制的探测器技术等。

作为拦截器,要求在拦截器逼近目标时,推进系统要连续喷气,其喷气时间要短且满足要求(如 10 s ~ 20 s)。目前,美国不仅研制出了采用轻型碳纤维材料燃料贮箱的冷气推进系统和肼推力器,还实现了小型化并可达到实用水平,使推力器的推力和重量比提高了 1 个数量级。还可以采用推力矢量控制技术,使拦截器的轨道控制发动机推力线通过拦截器质心位置,能进行推力矢量控制。一般采用双组元轨控发动机,国外比冲高达 285s,发动机推质比达 1200 : 1,所以,很容易使拦截器的轨控发动机具有大的稳态推力,提高了变轨能力和控制精度。

4 十年来国外动能拦截取得重大发展

4.1 验证了用动能拦截器防御弹道导弹与反卫星技术的可行性

1985 年 9 月,美国空军利用一枚空中发射的动能反卫星武器,成功地摧毁了一个报废的卫星;1988 年以来,已先后进行了 20 多次悬浮飞行试验,验证了用于反导弹和反卫星的各种功能拦截器的动能杀伤飞行器,在空中稳定飞行、跟踪与瞄准

目标以及机动变轨的能力;近年来,美国进行了多次综合飞行试验 IFT (Integrated Fly Test),以验证其动能拦截器的综合性能;1999 年 6 月,美国又成功地摧毁了一枚带有多个模拟弹头的洲际导弹。

4.2 轻巧型方面取得突破性进展

天基动能拦截器是从美国 SDI “智能卵石”计划发展而来的,美国 SDI 计划有两项主要研究工作 — 拦截卫星及其导航系统和敏感器的研制,这两项工作主要是为“智能卵石”而研究的。实现“智能卵石”的必要条件是实现超小型化(重仅 6 kg),成本要大幅度下降。不过其重量是分 4 步逐渐下降,最后才降到 6 kg 的。

- 第一代,1988 年研制出的重仅 100kg 的航天器,也称作验证动能武器集成技术任务。

- 第二代,1992 年完成的重量为 20 kg 的航天器 — 大气层外轻型射弹武器 (LEAP)。

- 第三代,1996 年研制出的 16 kg 的航天器 — 地基动能武器 (GBI)。

- 最后,到 2000 年完成重量仅为 6 kg 的智能卵石武器。

表 1 给出了 16kg 航天器的质量分配情况。

动能武器的发展潜力和对其他技术的带动作用,主要体现在实现 KKV 的微型化方面(包括小体积和轻质量)。美国决定采用 256×256 碲镉汞焦平面三色红外探测器来获取、跟踪和识别目标。其尺寸和质量均很小,如 4096 元碲镉汞红外探测器质量只有 366 g,成本低到 3.17 美元/像元。德克萨斯与洛克韦尔两家公司分别为动能拦截器研制的运算速度为每秒 1 亿次和 5 亿次的超小型信号处理机,质量分别只有 75 g 和 70 g,体积仅为 60 cm³ 和 74 cm³。利顿公司为大气层外轻型射弹 (LEAP) 研制

出质量只有 110 g、体积为 16.4 cm³ 的光纤陀螺惯性测量装置。洛克韦尔公司火箭达因分公司为天基拦截弹研制的小型变轨发动机, 长度只有 12 cm, 质量为 56 g, 而推

力则高达 67.5 kg, 推力质量比达 1200:1, 响应时间不到 5 ms。关键技术设备实现了微型化, KKV 的尺寸和质量也随之微型化。

表 1 16 kg 航天器的重量

系统	仪器、设备	重量 (kg)
推进系统	250 N N ₂ H ₄ 发动机	计 2.6
	1.3 N N-2H ₄ 发动机	
	0.3 mmAl 密封 CFRP 储箱	
结构系统	复合材料结构	0.4
电源系统	LiCISI 电源	1.2
	DC/DC 转换器	0.35
姿态控制系统	IMU	0.35
通信系统	4 Mb/s 遥测用天线	1.4
观测仪器	星跟踪器	0.175
	可见光摄像机	0.22
	激光雷达	0.9
	红外摄像机	1.0
电气仪表系统	扁平电缆·微型插头连接器	0.85
干重量		计 10.195
燃料		6.0

4.3 “SDI” 计划红外导引头的发展状况

导引头是动能杀伤拦截器的核心, 因此红外导引头在 SDI 计划中占据重要位置。现在导引头已经发展到第三代和第四代。第三代以大气层外轻型射弹 (LEAP) 的红外导引头为代表, 第四代以正在研制的智能卵石 (BP) 红外导引头为代表。

第三代红外导引头的主要特点如下:

- (1) 采用凝视红外焦平面面阵, 灵敏度高, 分辨率好;
- (2) 红外探测器 256×256 焦平面面阵;
- (3) 没有机械扫描, 没有运动部件, 可靠性高;

(4) 低温电路和探测器混合集成在焦平面上, 降低了前置放大器的噪声;

(5) 无目标识别能力, 对外部信息的依赖性大。

第四代红外导引头的主要特点为:

- (1) 采用多模导引头, 波段采用可见光和红外, 几个波段同时工作;
- (2) 智能卵石采用 3 μm ~ 5 μm 和 8 μm ~ 14 μm 双色红外探测器, 可快速转换波段;
- (3) 采用液氮和相变材料制冷, 降温时间快, 如 LATS 计划光学系统降温时间为 2 分钟, BP 为 3 分钟;
- (4) 红外导引头实现智能化, 具有自动真假目标识别 (ATR) 的能力;
- (5) 对外部信息依赖较少, 有较大的

搜索视场。

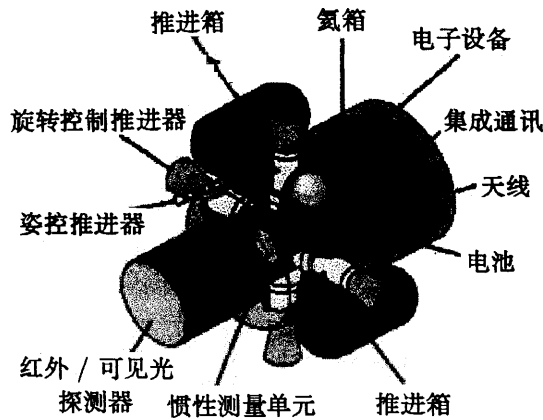


图 4 Raytheon 公司 KKV 模型

据信，美国已有多家公司研制出样机。例如，采用 256×256 凝视焦平面阵列三色红外探测器的寻的器，能自动进行目标截获、跟踪和识别。本文图（1）和图（4）分别为 Hughe 公司和 Raytheon 公司的 KKV 样机模型，美国波音公司 (Boeing North America) 也做出了三色红外寻的器的 KKV 模型。根据 1999 年的评审结果，美国决定在 2003 年部署这种系统。

动能拦截器是一种新概念空间技术。作为新型的空间武器，目前世界上处于实

验阶段。由于它拦截导弹和卫星的功能，不仅在战略防御上受到空前的重视，而且也作为天基信息网的安全和防卫手段，正加速发展。

参考文献

- [1] Jim Schefter, Dennis M. Davidson, "Missile Killers" POPULAR SCIENCE September 1988, p46 - p50.
- [2] Michael A. Dornheim, "National Missile Defense Focused on June Review", AW & ST / AUGUST 16, 1999, p66 - p68.
- [3] Stanley W. Kandebo, "EKV Contractor Selection Targeted for Fiscal 1999", AW & ST / MARCH 3, 1997 p52 - p55.
- [4] L. L. Hung, D. L. Webb, D. F. Elliott, V. T. Chandler, "IMAGE PROCESSING ALGORITHMS FOR KKV'S WITH IMAGING SENSORS" Rockwell International Corporation.
- [5] 何立萍, 邵姚定, "导引头信号和图像处理技术研究", 《电光与控制》1998 年第 2 期, p47 - p56.
- [6] 黄陪康, 万自明, 温德义, 许小剑, "动能拦截器技术的发展方向"《863 先进防御技术通讯》1995 年第 1 期, p1 - p25.

· 简 讯 ·

硅上面加锗的光电探测器在近红外显示出了高的响应

锗 (Ge) 光电探测器在光通信中是很重要的，因为锗可以用于将发射器、调制器以及探测器同基于硅 (Si) 的器件集成在一起。美国麻省理工学院和意大利罗马特扎大学的研究人员已制备成一种在 Si 上加 Ge 的异质结光电探测器。据说这种光电探测器在正常入射情况下显示出了已知的最高的近红外响应率。

研究人员在 p 型 Si 晶片上生长了一层 $1 \mu\text{m}$ 厚的 Ge，并在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下进行了退火。在 $1.32 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波长上，研究人员分别测得了 0.55 A/W 和 0.25 A/W 的响应率，这比基于 SiGe 多量子阱的导波器件的要好。在 1 V 时，该器件的反向偏置电流密度较大，为 30 mA/cm^2 ，研究人员把这种现象归因于 p 型 Si 与本征 Ge 之间异质结处的低势垒。他们说，采用 p-i-n 结构将可以减小这种密度。

□ 高国龙