

临近空间高超声速飞行器预警探测系统探索^{*}

刘尊洋, 陈天宇

(国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:为应对临近空间高超声速目标威胁,在分析目标辐射特性的基础上,探索了临近空间高超声速飞行器预警探测系统构建相关问题。设计了由指挥控制中心、信息处理中心以及位于不同平台的红外和雷达探测器构成的预警探测系统总体结构;分析了不同平台探测器的工作特点和基本任务;梳理了探测系统工作的基本流程;最后分析预警系统的主要能力需求及建设方向。研究成果能够为临近空间高超声速飞行预警系统建设提供一定参考。

关键词:临近空间;高超声速飞行器;预警系统;任务分析;总体设计;工作流程;能力需求

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2020.06.013

中图分类号:V47;TP73;TJ86

文献标志码:A

文章编号:1009-086X(2020)-06-0089-07

Exploration of Early Warning System for Near Space Hypersonic Vehicle

LIU Zun-yang, CHEN Tian-yu

(National University of Defense Technology, Electronic Countermeasure Institute, Anhui Hefei 230037, China)

Abstract: In order to deal with the threat of hypersonic target in the near space, the construction of early warning and detection system for hypersonic vehicle in the near space is explored, on the basis of analyzing the target radiation characteristics. The overall structure of an early warning system consisting of command and control center, information processing center and infrared and radar detectors on different platforms is designed. The working characteristics and tasks of detectors on different platforms are analyzed. The basic working process of the detection system is sorted out. Finally, the requirements and main construction directions of high-efficiency early warning system are analyzed. It is expected that the research results is of some reference value for the construction of hypersonic flight early warning system in the near space.

Key words: near space; hypersonic vehicle; early warning system; design and analysis; overall design; task analysis; workflow; capacity requirements

0 引言

临近空间高超声速飞行器(near space hypersonic vehicle, NSHV)具有飞行速度快、机动性强和突防

能力强等特点,世界军事强国均积极开展相关研究^[1]。人们在开展高超声速技术攻关的同时,也已经注意到对其高效预警的重要性,在红外、雷达探测技术以及预警系统构建等方面都进行了有益探

* 收稿日期:2019-07-17;修回日期:2020-06-29

基金项目:安徽省自然科学基金(1908085QF295)

第一作者简介:刘尊洋(1984-),男,江苏徐州人。讲师,博士,主要从事目标电磁特性建模仿真方面的研究。

通信地址:230037 安徽省合肥市蜀山区黄山路460号 E-mail:liukp2003@163.com

索。McIntyre 等人^[2]采用地基探测器获取了“隼鸟号”飞行器再入阶段在大气层内高超声速机动时的可见光和近红外波段辐射特性;周金伟等人^[3]采用工程算法,仿真分析了高超声速乘波体飞行器红外辐射特性以及地基红外探测机理;杨霄等人^[4]仿真分析了类 HTV-2 高超声速滑翔飞行器的红外辐射特征以及不同条件下红外探测器对该目标的探测能力;ZHANG Zhao 等人^[5]建模研究了高超声速巡航飞行器红外探测技术。罗冰^[6]分析了临近空间高超声速飞行器等离子效应对雷达探测的影响,并探索了消除隐身威胁的方法途径。喻晨龙等人^[7]分析了远程警戒雷达对于固定雷达散射截面(radar cross section, RCS)临近空间高超声速目标探测能力。上述研究为临近空间高超声速飞行器探测系统构建提供了重要参考,但上述文献在探测体系建设方面论述尚不够充分,且没有深入分析临近空间高超声速飞行器预警体系的运行机理和工作流程。

本文将在简要分析目标辐射特性的基础上,针对临近空间高超声速飞行器预警探测系统建设相关问题开展研究,具体工作包括目标特性分析、探测系统总体结构设计、各平台探测器任务能力分析、系统工作流程与系统能力需求分析 5 个方面。

1 目标辐射特性分析

1.1 红外辐射特性

NSHV 在临近空间高速飞行过程中,因气动热力效应弹体温度急剧升高,再加上高温尾焰,会发出强烈的红外辐射,为对其实施红外预警探测提供了有利条件。

不同类型的 NSHV,其红外辐射特性不同。以使用超燃发动机的高超声速巡航(hypersonic cruise, HC)飞行器为例,其红外辐射主要来自于飞行器表面、发动机表面及其尾焰。飞行器表面的红外辐射,是飞行器在大气空间高速飞行的过程中,头部周围的空气受到剧烈压缩,形成激波层,激波层内来流的动能转化为内能,形成强烈的气动加热效应,使得飞行器上下表面温度急剧升高(Ma 数为 5 时,表面温度约为 1 122 K; Ma 数为 6 时,表面温度约为 1 518 K)。飞行器表面由高温(1 122 K)产生的红外辐射与其背景环境(取 30 km 高空,环境温度为 220 K)相比十分明显^[8]。另外,飞行器表面对

太阳的反射也会存在红外辐射特征,但这一部分与飞行器表面的自身辐射相比一般可以忽略。发动机表面及其尾焰的红外辐射,主要包括发动机工作时,发动机表面的高温蒙皮(约 600 ~ 1 100 K)以及发动机喷射的高温尾焰(约 800 ~ 2 000 K)^[9]。

1.2 电磁波散射特性

NSHV 在大气空间高速飞行的过程中,与空气剧烈摩擦所产生的气动加热效应,会使周围空气温度急剧升高;在高温作用下,飞行器表面材料被烧蚀形成气体,与周围空气在高温下发生电离,从而在飞行器周围会形成一个约 10 ~ 20 cm 的高温等离子薄层,即“等离子鞘套”^[10-11]。

一方面,等离子鞘套与电磁波之间会发生折射、吸收等反应,从而造成电磁波传输衰减、能量大量吸收和辐射效率下降,严重影响了飞行器的无线电通信效能,甚至会造成通信中断,也就是“黑障”现象。

另一方面,等离子体和拖尾会导致飞行器自身的雷达 RCS 下降,NSHV 的 RCS 一般在 0.01 ~ 0.1 m²,等离子体可覆盖 300 MHz ~ 300 GHz 的所有微波频段,可能会使飞行器对雷达探测具有了“热隐身”效果。

根据 NSHV 的雷达特性分析结果,由于等离子体效应,雷达对 NSHV 的探测面临一定挑战,需要结合理论和实验研究优选性能优异的现有体制雷达,同时针对性开展对 NSHV 类目标具有较强探测能力的新型雷达研发工作。

2 预警探测系统结构设计

分析发现,临近空间高超声速飞行器的特点主要包括机动速度快,等离子体鞘套效应,弹体温度高以及飞行高度相对传统弹道导弹低 4 个方面。其自身特性导致现有导弹预警雷达的探测能力受到影响,同时为红外探测和持续跟踪提供了可能。本文在分析 NSHV 目标上述特性的基础上,初步设计临近空间高超声速飞行器预警探测系统如图 1 所示。

临近空间高超声速飞行器预警探测系统由地面指挥控制中心、信息处理中心以及各平台探测器构成,用于及时对 NSHV 完成发现识别、分析判断和提供拦截引导信息等工作。通过部署在天基、临近

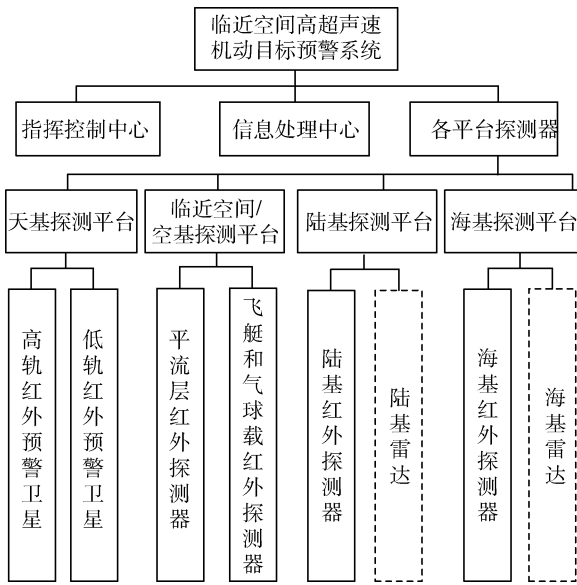


图1 临近空间高超声速飞行器预警探测系统结构

Fig.1 Structure of early warning and detection system for NSHV

空间/空基、陆基、海基平台上探测器,全方位、分阶段探测,为信息处理中心提供持续、精确的目标探测信息;信息处理中心通过融合处理多源情报信息,形成目标预警综合情报并报告指挥控制中心;指挥控制中心生成探测器接力探测引导方案,同时开展决策部署,基于效能最优化原则将拦截任务下发具体拦截器,并引导拦截武器系统进行拦截。各平台的探测器主要负责对目标实施不间断的探测,并将预警情报信息向其他预警探测平台交接,同时传输给指挥控制中心,指挥控制中心负责对信息进行分析、融合处理,并引导各平台探测器进行更精细的探测。

考虑到 NSHV 特有的辐射和机动特性,设计的系统综合使用各平台搭载的雷达和红外探测器对其进行探测。传统弹道导弹的红外辐射主要是指初始段的尾焰,而在飞行中段弹体红外辐射并不强烈,目前仅使用高、低轨红外预警卫星对其红外辐射进行探测。NSHV 飞行中段由于在大气层内高速机动,弹体与大气剧烈摩擦导致温度急剧升高,目标将呈现出强烈的红外辐射特性,对于高超声速巡航飞行器而言,超燃冲压发动机的高温尾焰会进一步增大目标红外辐射强度,这将为对其持续进行红外探测提供有利条件。因此,可以继续使用天基红外探测器对其持续跟踪,同时引导临近空间/空基、

陆基和海基平台的雷达和红外探测器对其精确探测。目标飞行的末段,距离地面较近,陆、海基平台可发挥其距离近、分辨率高的优势对目标实施精确探测。

相比于弹道导弹的预警探测系统,该系统的特点主要有:

(1) 针对巡航段目标的红外辐射特性,增加了陆、海基红外探测系统;

(2) 针对 NSHV 飞行中段强烈的红外辐射特性,继续使用高轨红外预警卫星进行持续探测和跟踪,增强系统总体跟踪能力。

3 各平台探测器特点及任务分析

3.1 天基预警探测平台

天基预警探测平台以卫星为载体,主要依靠搭载的红外探测设备以实现对其初始段高超声速目标的预警探测及监视。文献[4]分析了各平台红外探测技术的基本探测范围,由于本文讨论探测器为红外探测系统,不考虑折射、绕射情况,参考其红外探测范围,可得天基预警探测平台基本探测区域示意图,如图2所示。天基预警探测平台对 NSHV 的探测主要是以地表为背景的下视探测和以临边辐射为背景的侧视探测。具有视场范围大,探测距离远、漏警率低的优点,便于对广阔的临近空间进行探测搜索和概略识别。主要探测装备包括:高轨红外预警卫星和低轨红外预警卫星等^[12]。但由于探测距离远而存在分辨率低的缺点,所以需要和其他平台的探测器配合使用。

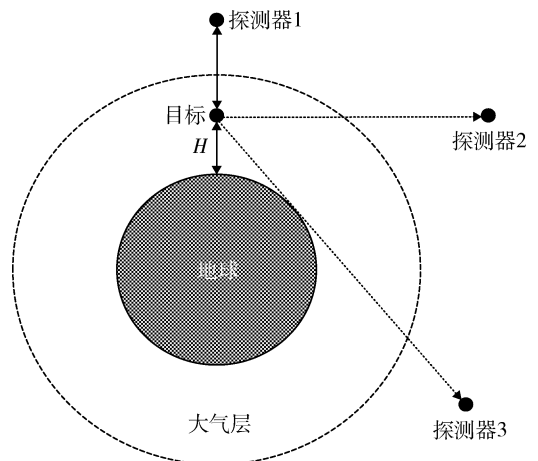


图2 天基平台探测示意图

Fig.2 Detection schematic of space-based platforms

高轨红外预警卫星主要以地表为背景进行探测,其背景辐射复杂多变,通常选用大气吸收波段以降低地球与大气背景对探测的影响,可对全球范围内的 NSHV 进行探测和跟踪。由于部署高度较高,其具有视场范围大、漏警率低的优点,以地球同步轨道为例,只需要 3 颗卫星就可以实现对除两极高纬度区域外的全球区域的覆盖。但同时高轨预警卫星也存在分辨率较低的问题,以典型的美国 SBIRS-GEO 预警卫星为例,其地面分辨率约为 1 km。

低轨红外预警卫星轨道较低,相对高轨红外预警卫星视场范围较小,但其距离目标较近,分辨率更高,能有效弥补高轨红外预警卫星分辨率低的缺陷。但由于轨道高度较低,视场范围相对较小,需要更多卫星才能实现全球覆盖。以卫星位于高度为 1 600 km 的太阳同步轨道为例,为实现对全球范围的有效覆盖,需要 24 颗卫星组网工作。使用高、低轨红外预警卫星同时对目标跟踪,更好地综合了高、低轨道卫星的特点,以实现对他标准确、稳定、高效的探测。

3.2 临近空间/空基预警探测平台

临近空间/空基预警探测平台主要包括平流层飞艇、浮空气球或各类飞机等。虽然刘重阳等人^[13]探讨了临近空间基雷达对高超声速目标的探测能力,但考虑实用性,建议临近空间/空基探测平台搭载探测载荷为高性能红外探测器。该平台探测设备在空间位置上处于天基和陆基之间,较天基预警探测具有更高的探测分辨率及更近的探测距离,较陆基预警探测具有更高的视角、更强的机动能力和生存能力;但是其同天基平台一样,受平台承重能力的限制,无法承载重量过重,体积过大的探测器,从而影响其探测能力。主要任务是独立对任务区域进行探测,或在指挥控制中心和天基预警探测平台的引导下对指定空域进行探测搜索,并配合地基探测平台共同完成探测工作。主要探测装备包括:平流层飞艇、气球以及各类飞机搭载的红外探测器等。

临近空间/空基预警探测平台的红外探测背景主要为临近空间或太空背景,相比地表背景,背景更加纯净。在 Ma 数为 5 ~ 6 时,NSHV 表面的温度大约在 1 122 K 至 1 518 K 之间,远高于其探测背景

温度,因而具有明显的目标对比度。临近空间/空基预警探测平台的探测区域如图 3 所示^[4,14]。

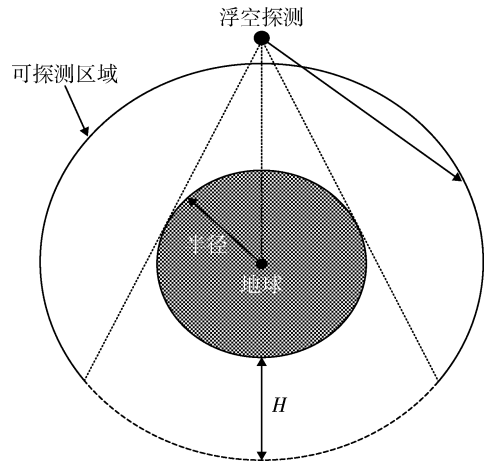


图 3 临近空间/空基平台探测示意图
Fig. 2 Detection schematic of near space/ space-based platforms

3.3 陆基和海基预警探测平台

陆基和海基预警探测平台(如图 4 所示)以陆地、岛屿和舰船为依托,以红外和雷达探测器为主要装备构成预警探测区,对高超声速目标进行预警探测及跟踪监视^[4]。通常在指控中心和天基、临近空间/空基预警探测平台的引导下对指定目标区域搜索监视,探测精度高。主要探测装备包括:陆、海基雷达和红外探测器。

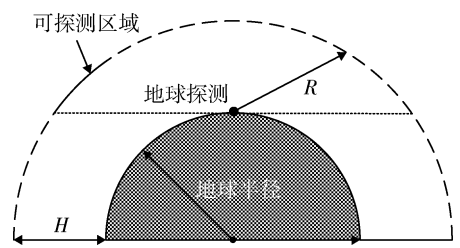


图 4 陆、海基平台探测示意图
Fig. 4 Detection schematic of land-based and sea-based platforms

陆、海基红外探测器是以天空为背景的上视探测,其距离目标更近,分辨率更高,探测能力也更强,可用于巡航段目标的精确识别和跟踪,但由于受地球曲率影响,对于 25 km 高度的 NSHV,则位于海平面红外探测器的最大探测距离约为 648 km。但陆基和海基平台受视场范围小的影响,早期发现

目标困难,因此,主要用于对探测范围内目标巡航段和俯冲段的目标实施精确识别。

陆基和海基雷达也可对巡航段和俯冲段的NSHV进行探测,由于NSHV特殊的雷达特性,在进行雷达探测时需要选择合适的波段和合适的工作模式,保证其具有足够的功率和持续的跟踪能力。可采用一些现有体制雷达中适合NSHV探测的雷达,也可发展针对NSHV的新体制雷达^[15]。

陆基平台的雷达由于不受平台承重能力的限制,可以建造体积庞大的高性能雷达,与陆基红外探测器类似,由于受地球曲率影响,对于25 km高度的NSHV,位于海平面高度雷达平台的最大探测距离约为648 km,且由于固定配置,容易被敌方实施打击摧毁,生存能力不强。

海基平台作为陆基探测平台的补充,较陆基预警探测平台具有部署位置更灵活、机动能力更强的优点,可以与陆基平台共同担负对目标的高精度探测任务。

4 系统工作流程分析

NSHV的预警探测系统是在指挥控制系统的组织协调下,通过多种平台搭载的雷达和红外探测器之间的相互配合统一完成目标预警任务的,基本工作流程如图5所示。

首先,利用高轨红外预警卫星探测目标的红外辐射信息,及时发现目标,进而通过星间链路直接引导或通过指挥控制中心,引导合适的低轨红外预警卫星对目标区域进行重点探测,低轨卫星发现目标后,高、低轨红外预警卫星可以同时为目标实施跟踪。如果能够完成高低轨卫星的全球组网运行,

则可以确保对NSHV目标的及时发现和稳定跟踪。随后,在指挥控制中心的引导下,临近空间/空基雷达和红外探测器对指定目标区域进行粗识别和跟踪,并根据目标信息引导陆、海基平台对目标区域实施精确识别。整个预警探测过程中,各探测平台实时将目标信息报告指挥控制中心,指挥控制中心对各平台探测器传输来的目标信息进行综合分析处理,并及时引导拦截武器系统拦截目标。

5 系统能力需求分析

为了实现对临近空间高超声速目标的高效探测,预警探测系统应在以下4个方面加强建设。

(1) 提高探测器的探测能力

各平台探测器是系统构成的基础,探测器的探测能力在一定程度上决定着整个系统的探测能力。研发更有效、更有针对性的红外和雷达探测器,可以从源头上提高系统的探测能力。

(2) 提高信息传输能力

临近空间高超声速飞行器预警探测系统探测的范围广、目标多、信息量大,要求系统必须以最快的速度实时、准确地传输目标信息,最大程度地缩短信息在传输过程中的时间,保障拦截武器系统有足够的时间实施拦截。

(3) 增强信息处理能力

临近空间高超声速飞行器预警探测系统覆盖范围广、传感器类型和平台多,要求系统具有较强信息处理能力,能够高效、准确地对多个平台探测器传输来的目标信息进行分选识别,以便进一步引导各平台探测器进行跟踪监视和武器系统进行拦截。

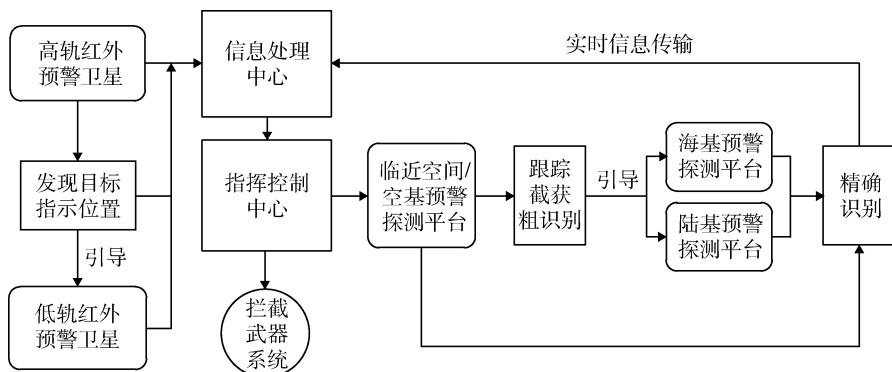


图5 系统工作流程示意图

Fig. 5 the diagram of systematic workflow

(4) 合理调度系统内资源

临近空间高超声速飞行器预警探测系统融合了雷达和红外2种探测手段,包含有陆、海、空、天4种探测平台,这就要求系统能够在特定时间准确、高效地调度各平台探测器资源,从而提升系统的探测能力和作战效能。

6 结束语

本文结合临近空间高超声速飞行器辐射和运动特性,结合各类探测器的性能特点,开展了对以指挥控制中心、信息处理中心和各平台探测器为主要组成单元的临近空间高超声目标预警探测系统的探索,并初步分析了系统各平台探测能力特点、系统工作流程以及系统建设的能力需求。

参考文献:

- [1] S. Praneeth Reddy, Sultan Cornel, Rakesh K Kapania, et al. Aeroelastic Control-Oriented Modeling of an Air-breathing Hypersonic Vehicle[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2018, 41(5): 1136-1149
- [2] MCINTYRE T J, KHAN R, Troy N Eichmann. Visible and Near Infrared Spectroscopy of Hayabusa Reentry Using Semi-Autonomous Tracking[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2013, 51(1): 31-38.
- [3] 周金伟,李吉成,石志广,等.高超声速飞行器红外可探测性能研究[J].光学学报,2015,35(5):0504001. ZHOU Jin-wei, LI Ji-cheng, SHI Zhi-guang, et al. Research of Infrared Detectability of Hypersonic Vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0504001.
- [4] 杨霄,牛青林,贺志宏,等.类HTV-2高超滑翔目标红外特征与可探测性分析[J].光学学报,2017,37(12):1204001. YANG Xiao, NIU Qing-lin, HE Zhi-hong, et al. Analysis of Infrared Characteristics and Detectability of HTV-2 Type Vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1204001.
- [5] ZHANG Zhao, GAO Chang-sheng, JING Wu-xing. Infrared Measurement and Composite Tracking Algorithm for Air-Breathing Hypersonic Vehicles[J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(2): 023023.
- [6] 罗冰.助推滑翔导弹突防对区域反导雷达威胁分析[J].舰船电子对抗,2015,38(4):44-49. LUO Bing. Threat Analysis Booster Glide Missile Penetration to Area Antimissile Radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2015, 38(4): 44-49.
- [7] 喻晨龙,谭贤四,李凡,等.远程预警雷达探测能力分析[J].现代防御技术,2017,45(2):134-141. YU Chen-long, TAN Xian-si, LI Fan, et al. Detection Ability Analysis on Long Range Early Warning Phased Array Radar[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(2): 134-141.
- [8] 张海林,周林,左文博,等.临近空间高超声速导弹红外特性研究[J].激光与红外,2015,45(1):41-44. ZHANG Hai-lin, ZHOU Lin, ZUO Wen-bo, et al. Study on Infrared Radiation Feature of Near Space Hypersonic Missile[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 41-44.
- [9] 孙文,王刚,姚小强,等.临空高超声速飞行器目标特性分析[J].火力与指挥控制,2017,42(1):14-20. SUN Wen, WANG Gang, YAO Xiao-qiang, et al. Target Characteristics Analysis of Near Space Hypersonic Vehicle[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 14-20.
- [10] 陈浩,杨予昊,刘伟,等.临空高超飞行器雷达探测问题分析[J].现代雷达,2018,40(8):8-11. CHEN Hao, YANG Yu-hao, LIU Wei, et al. Target Characteristics Analysis of Near Space Hypersonic Vehicle[J]. Modern Radar, 2018, 40(8): 8-11.
- [11] 龚旻,谭杰,李大伟,等.临近空间高超声速飞行器黑障问题研究综述[J].宇航学报,2018,39(10):1059-1070. GONG Min, TAN Jie, LI Da-wei, et al. Review of Black-out Problems of Near Space Hypersonic Vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(10): 1059-1070.
- [12] 敬韩博,王英瑞.临近空间高超声速目标天基红外探测技术研究[J].现代防御技术,2016,44(6):80-84. HAN Jing-bo, WANG Ying-rui. Space-Based Infrared Detection for Near Space Hypersonic Targets[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(6): 80-84.
- [13] 刘重阳,江晶,李佳炜,等.临基雷达对高超声速目标探测能力分析[J].空军预警学院学报,2019,33(3):157-162. LIU Chong-yang, JIANG Jing, LI Jia-wei, et al. Analysis on Hypersonic Targets Detection Capability of Near-Space Based Radar[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2019, 33(3): 157-162.
- [14] 杨虹,张雅声,丁文哲.探测临近空间高声速目标的飞艇组网方法研究[J].现代防御技术,2017,45(2):40-48. YANG Hong, ZHANG Ya-sheng, DING Wen-zhe. Net-

working Design of Airship for Detecting High Dynamic Target in Near Space[J]. Modern Defence Technology, 2017,45(2):40-48.

- [15] 许稼,彭应宁,夏香根. 基于检测前聚焦的临近空间高动态飞行器雷达探测研究[J]. 雷达学报,2017,

6(3):229-238.

XU Jia, PENG Ying-ning, XIA Xiang-gen, et al. Focus-Before-Detection Methods for Radar Detection of Near Space High-Maneuvering Aircrafts [J]. Journal of Radars,2017,6(3):229-238.

(上接第 59 页)

YAN Xiao-yong, ZHANG Cheng, YANG Shu-xing. Decoupling Technique for a Class of Rolling Missile[J]. Journal of Ballistics,2009,21(4):17-25.

- [6] 李永亮. 十字型鸭翼布局旋转弹控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.

LI Yong-liang. Research on Flight Control of Rolling Rocket with Cruciform Configuration Canards[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

- [7] 范世鹏. 双通道控制滚转导弹的控制技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.

FAN Shi-peng. Research on Control Technologies for Self-Spinning Missiles with Double-Channel Actuator [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2015.

- [8] LURIE B J. Three-Parameter Tunable Tilt-Integral-Derivative (TID) Controller [P]. US Patent US5371670, 1994.

- [9] PODLUBNY I. Fractional-Order Systems and $PI^{\alpha}D^{\beta}$ Controller [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1994, 44(1):208-214.

- [10] WEST B J, BOLOGNA B, GRIGOLINI P. Physics of Fractal Operators[M]. New York:Springer,2003.

- [11] PETRAS I. Fractional-Order Feedback Control of a DC Motor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2009, 60(3):117-128.

- [12] OUSTALOUP A, SABATIER J, LANUSSE P. From Fractional Robustness to the CRONE Control [J]. Fractional Calculus & Applied Analysis, 1999, 2(1):1-30.

- [13] XUE Ding-yu, ZHAO Chun-na, CHEN Yang-quan. A Modified Approximation Method of Fractional Order System[C]//Mechatronics and Automation. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang;IEEE,2006:1043-1048

- [14] 邹汝平,张延风. 旋转导弹自旋频率设计[J]. 兵工学报,2007,28(2):220-222.

ZOU Ru-ping, ZHANG Yan-feng. Design of Self-Spin Frequency for Rotating Missiles[J]. Acta Armamentarii, 2007,28(2):220-222.

- [15] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2007. HU Shou-song. Automatic Control Theory[M]. Beijing: Science Press,2007.

(上接第 73 页)

- [13] 魏继才,黄谦,胡晓峰. 层次分析法在武器系统效能建模中的应用[J]. 火力与指挥控制,2007,27(3):23-28.

WEI Ji-cai, HUANG Qian, HU Xiao-feng. The Application of Analytic Hierarchy Process to Effectiveness Modeling [J]. Fire Control & Command Control, 2007, 27(3):23-28.

- [14] 张福元,陈庆华. 基于主、客观赋权的综合集成方法及其应用[J]. 装备指挥技术学院学报,2003,14(6):106-110.

ZHANG Fu-yuan, CHEN Qing-hua. Comprehensive Integration Method Based on Subjective and Objective Weighting and Its Application [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2003, 14(6):106-110.

- [15] 陈伟,夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实际与认识,2007,37(1):17-22. CHEN Wei, XIA Jian-hua. Optimal Combination Weighting Method Based on Subjective and Objective Weight Information [J]. Mathematics Npractice and Theory, 2007,37(1):17-22.