

多弹协同技术在防空导弹发展中的应用探讨

徐胜利, 陈意芬, 范晋祥, 殷 玮
(上海航天技术研究院第八设计部, 上海 201109)

摘要: 为应对复杂战场环境下多平台多目标体系作战的空中威胁, 提出多弹协同作战设计思路并分析了其关键技术。首先分析了国内外多弹协同武器装备的应用及技术发展概况; 其次探讨了信息化条件下面向防空的多弹协同作战体系及协同作战策略; 接着以这些原则为基础提出面向防空的多弹协同关键技术设计理念, 主要阐述了多弹协同总体、多弹编队飞行控制、多弹协同数据链、多弹协同制导验证4项关键技术; 最后展望了面向防空的多弹协同精确制导武器的一些发展思路。

关键词: 精确制导; 多弹协同; 体系作战; 综合对抗; 防空导弹

中图分类号: TJ765.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0055-05

Application of Multi-missile Cooperative Technology in Development of Air-Defense Missiles

XU Sheng-li, CHEN Yi-fen, FAN Jin-xiang, YIN Wei
(The 8th Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aimed at the aerial threats in systematic combat of multi-platform, multi-target under complicated environment, the design philosophy of multi-missile cooperative operation is proposed with its key technologies. First, analysis is made to the application and development of the multi-missile cooperative guidance in the world. Then the combat system and operation tactics of multi-missile cooperative combat for air defense are discussed. Based on which, the design concepts of the key technologies of multi-missile cooperation for air defense are proposed, including such technologies of overall technology of multi-missile cooperation, flight control of multi-missile formation, data chaining, and confirmatory experimentation. Some ideas about the development of multi-missile cooperative guidance are given in the end.

Key words: precise guidance; multi-missile cooperation; systematized operation; integrated countermeasures; air-defense missile

0 引言

近十多年间, 作战飞机和机载武器性能不断提高, 作战模式由过去的单一作战飞机之间的对抗, 转变为多种飞机编队联合群体的体系与体系的对抗。目前, 以预警机为空中指挥控制中心, 具有高性能的战斗机为主攻武器, 并辅以电子干扰机, 进而致瘫痪或摧毁敌方防空夺取制空权, 将是未来空战的基本特征。传统的单导弹作战模式已无法满足日益复杂的战场环境空战任务的需求^[1]。

多导弹协同作战以适应未来作战模式为目的, 调

整作战理念、打破作战过程中各导弹之间没有任何联系与合作的传统思想, 将参战的所有导弹构成一个作战网络, 在网络指控中心的调控和管理下, 目标探测平台、导弹发射平台和各导弹间互相通信、信息共享、取长补短, 以取得更高的作战效能为最终目的, 是未来面向智能防空的导弹发展方向之一。

1 多弹协同技术国内外发展概况

多弹协同作战问题的研究越来越受到世界强国的关注, 以美国和俄罗斯为代表正积极探索和研制具备更好战场适应性的多弹协同武器装备, 文献[2-3]分别基于最优控制、滑模控制等现代控制理论提出了可同时控制多枚导弹攻击角度和攻击时间的制导律。多弹协同技术的研究在国内尚处于起步阶段, 在防空导

弹领域应用尚属空白。近年来,国内一些学者对多弹协同攻击技术进行了探索性的分析和展望,理论研究主要关注多弹攻击单个目标的情形,将终端时间和终端角度作为约束条件来实现多枚导弹之间的协同^[4-5]。

20 世纪 70 年代中期,美国第一次提出了协同作战概念,新一代作战系统“网火”就是武器协同研究最典型的代表。它是美国陆军作战系统的一个重要组成部分,任务规划计算机是“网火”系统的核心,用于拟定与执行规划。其工作过程是:首先发射巡逻攻击导弹,在 INS/GPS 导引下飞至指定目标区上空盘旋滞留,并用激光雷达搜索目标,一旦发现敌方踪迹,即发射成本较低的精确攻击导弹将目标摧毁。

俄罗斯研发的花岗岩超声速反舰导弹^[6]可融合陆、海、空基传感器,甚至卫星获得的目标信息,在一次发射的多枚导弹中,有 1 枚“领弹”,它在 25 km 高空飞行,把目标数据通过弹间数据链传输给在低空飞行的其他导弹,其他攻击弹则灵活地采用低高度飞行轨迹来增加隐蔽性。一旦“领弹”被拦截,马上有 1 枚导弹升空负责继续“指挥”。发现目标后,弹群才散开,导弹上主动导引头各自进行末端引导,以俯冲或掠海方式对目标实施攻击。

2 多弹协同作战体系组成及协同策略探讨

2.1 多弹协同作战体系组成

本文基于多弹协同作战的思想提出一种应用于防空武器的作战体系,在目标探测、信息传输等技术的支撑下,提高多弹协同武器系统的抗干扰能力、突防能力,扩大攻击区域并大大降低费效比,其研究背景为多枚导弹协同攻击防区外远距目标的作战使用问题,本文针对多弹协同攻击网络化作战体系的体系结构、多弹协同策略进行探讨。多弹协同作战体系如图 1 所示,主要由目标探测平台、导弹发射平台、多弹、目标以及网络指控中心组成。

1) 目标探测平台:可采取天基、空基和地基探测装备相结合的探测方式,探测获取目标相对探测平台的运动信息;导航装置获取探测平台运动信息;信息处理单元对输入信息进行滤波与融合处理,计算获得探测平台、目标的运动信息;接收/发送单元接收作战体系管理指令,发送目标运动信息。

2) 导弹发射平台:主要有静平台、动平台两种发射方式,若为动平台发射,控制单元按飞行指令控制发射平台机动飞行,完成导弹发射过程;导航装置获取发射平台运动信息;武控系统对输入飞行指令和信息进行处理计算,产生导弹发射指令;接收/发送单元接收目标、导弹运动信息,发送导弹飞行指令。

3) 多弹:其为多枚导弹组成的一个协同作战系统,导航装置获取导弹运动信息;飞行控制按制导指令控制导弹机动飞行,完成制导过程;接收/发送是接收目标探测平台发送的目标信息,发送导弹运动信息;指令处理对输入信息进行处理,计算初、中制导指令,对导弹制导过程的切换进行管理;导引头搜索、截获、跟踪目标,使导弹由中制转入末制导。

4) 目标:作战对象可以为单一目标,也可为群目标。当群目标攻击时,需要对空中多个目标同时进行跟踪、识别、火控计算并对多枚导弹同时进行制导,在发射导弹后,目标探测平台继续保持对目标的探测,按照某种决策准则,将不同位置、不同价值的目标分配给不同的导弹,避免重复攻击和遗漏,并通过多路编码数据链把正在攻击的各个目标的运动状态信息传输给相配套的导弹。在中制导段,弹载设备虽不探测目标,但通过目标修正指令信息来帮助导弹飞向目标;在中、末制导交班段,只要导弹成功截获该目标,那么在末制导段导弹对目标的分辨可通过导引头锁定所截获的目标而不跟踪其他目标来实现。

5) 网络指控中心:包含卫星数据链、空空数据链、地空数据链、广播通信网等,按通信网调度、管理指令组成的体系通信网络,传输作战体系数据指令信息。

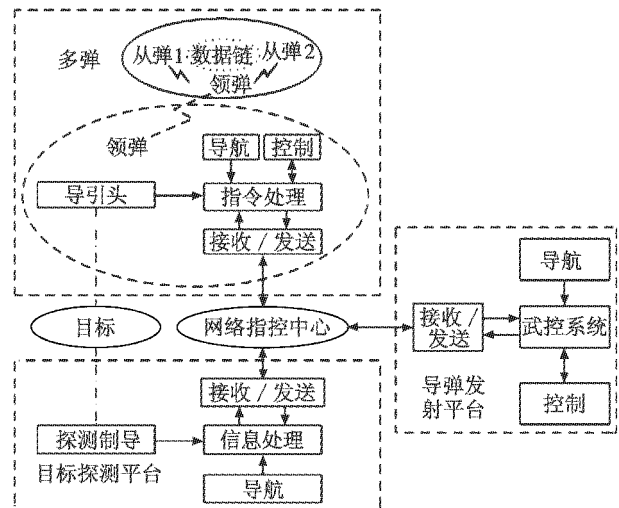


图 1 多弹协同作战体系组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of systematized operation for multi-missile cooperation

2.2 多弹协同策略探讨

2.2.1 多弹协同作战样式

为了充分发挥多弹整体作战效能,针对不同的作战对象或不同的作战环境,多弹协同作战的协同样式主要有 4 种模式:平台协同、功能协同、空间协同和时间协同。1) 平台协同:在不同平台上发射导弹,以达到同时突防或攻击的目的。2) 功能协同:领弹和从弹

的协同、高价值和低价值导弹的协同等。3) 空间协同:在不同的方位上同时攻击或从低、中、高空实施三位一体的突防。4) 时间协同:多弹同时齐射,或从不同区域和不同时间发射,同时到达目标区域。

2.2.2 多弹协同策略模式

在多弹协同作战的过程中,多弹协同策略主要有两种模式。

1) 主从协同模式。其主要思想是领弹完成导引和攻击任务,并接收从弹传送的目标信息,领弹经综合处理形成控制信息,引导从弹完成攻击任务;从弹除依靠自身导引头探测目标之外,还接收领弹传送的综合控制信息。

2) 同时协同模式。弹群不分领弹、从弹,多弹除依靠自身导引头探测目标之外,还分别接收弹群中其他导弹传送的目标信息,经各自综合处理后形成控制信息,控制导弹飞向目标。

3 多弹协同关键技术分析

由于多导弹协同技术的研究涉及到空气动力学、飞行力学、制导控制、目标跟踪识别、信息处理以及作战效能分析等诸多学科和专业,依据面向防空导弹武器系统不同的作战需求,从课题项目研究及相关技术分析,关键技术主要有以下几个方面。

3.1 多弹协同总体技术

根据作战任务特点和目标特征情况,为最大发挥多弹拦截武器系统组网协同作战效能,开展多弹协同总体优化与集成技术研究,图 2 所示为多弹协同总体框图。

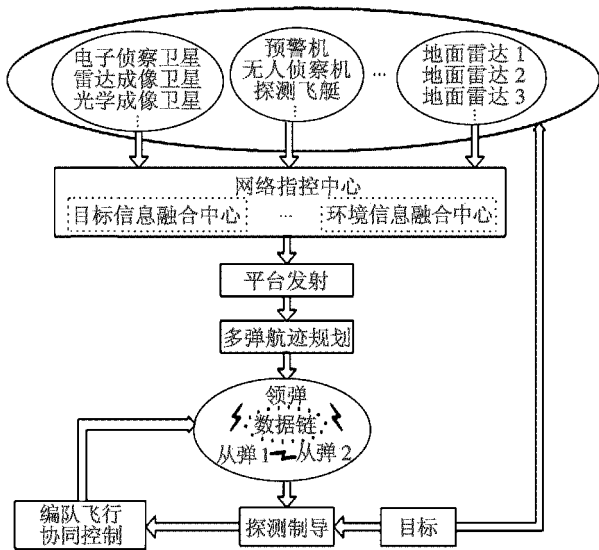


图 2 多弹协同总体框图

Fig. 2 Structure of the system for multi-missile cooperation

首先,采取天基、空基和地基探测装备相结合的探测方式,具体包括侦察卫星、预警机、地基超视距雷达

等,形成对目标的广域搜索发现、探测识别、连续跟踪定位能力;然后,将探测的所有信息构成一个信息融合中心,在网络指控中心的调控和管理下,探测平台、发射平台与导弹间互相通信、信息共享;接着,依据作战需求确认网络中各导弹的不同作用及角色,研究多弹异构方式及领弹、从弹组合模式,采用激光制导、红外制导、雷达制导、多模复合制导等不同制导体制的导弹进行协同攻击;其次,领弹采取 INS/BDII 长航时高精度多源组合导航技术,从弹则采用融合 MEMS 惯性导航与领弹修正信息的组合导航技术,实现保证导航性能和制导精度的低成本导航;另外,通过数据链技术完成探测平台、发射平台、领弹、从弹信息互通,构成“探测平台-发射平台-领弹-从弹-目标”诸多单元的多弹协同制导回路。

3.2 多弹编队飞行协同控制技术

导弹编队飞行协同控制是指在战场环境约束下,多枚导弹组成的编队向目标飞行过程中相互之间保持一定几何形态的控制技术^[7]。首先,在获取目标信息、威胁信息、地理环境信息以及导弹性能参数的基础上,设计出评价函数并且利用路径规划算法进行飞行路径规划,在飞行的初段和中段,多枚导弹按照一定的几何队形进行编队协同飞行;然后,从时间和空间两方面对参考航路进行评价,从时间协同角度,协同条件为同时到达目标、或以一定时间间隔到达目标等,从空间协同角度,协同条件为不能碰撞、不超过最大通信距离、或最佳协同距离范围等,对不满足协同规划要求的航路进行修改,如此反复直至得到满足协同条件的每枚攻击弹的飞行航路;之后,将生成的协同航迹通过数据链分别装订到各个导弹中,通过网络指控中心控制导弹按预定的航路飞行,并且根据探测平台传来的战场信息的实时变化来调整协同航迹;最后,在飞行的末段,多枚导弹达到目标截获距离后寻的制导飞行。图 3 所示为多弹协同制导控制原理框图^[8]。

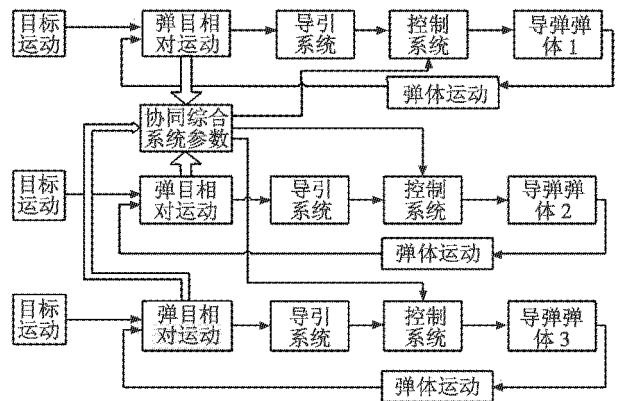


图 3 多弹协同制导控制原理框图

Fig. 3 Block diagram of multi-missile cooperative control and guidance

在群目标攻击中,“如何解决哪枚导弹攻击哪个目标”的问题^[9],即协同目标分配问题,是多弹编队飞行协同控制技术的关键,现有的航迹规划方法尚未能充分考虑多弹协同航迹规划约束的复杂性,如战场环境约束、目标威胁的类型和攻击区域等,目前,相关研究与实用还有差距,但鉴于其重要性,未来势必会成为研究热点。

3.3 多弹协同数据链技术

由多枚导弹在空中动态组网,形成多弹协同攻击网络化作战系统的关键技术之一,即数据链技术,图4所示为多弹协同数据链组成示意图。多弹通过网络指控中心和战区内载机、地面指控系统、预警机、卫星等作战平台组成战术数据传输/交换和信息处理网络,实现初、中、末制导信息共享;在末制导工作过程中,由领弹探测目标数据,然后通过数据链向从弹分配目标,大大增强对目标的攻击能力。数据链技术赋予了导弹更广泛的作战任务和更多功能,可在飞行中执行对目标的持续跟踪、再次瞄准或取消打击任务;此外,数据链还容许多枚导弹在打击前报告自身及目标状态,从而为搜集战场评估信息提供新的方式。多弹协同数据链技术主要需要解决制导信息网设计、低时延传输、时空统一性、信息交互性、智能组网、快速精确的目标定位与跟踪等问题。

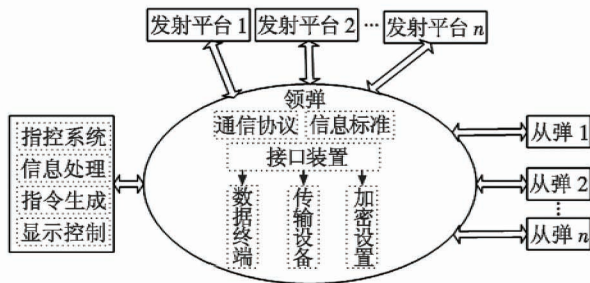


图4 多弹协同数据链组成示意图
Fig.4 Schematic diagram of data chaining for multi-missile cooperation

3.4 多弹协同制导验证技术

多弹协同制导半实物仿真试验技术是多弹协同技术应用验证评估的有效方式之一,图5为多弹协同制导半实物仿真组成示意图。结合激光、红外、雷达和多模制导等不同体制的半实物仿真系统,以及领弹主惯导(INS/BDII 组合导航)/从弹 MEMS 导航半实物仿真系统,采用多类系统并行通讯联网构建适应多弹协同制导控制系统的试验验证系统。一方面,多弹协同制导控制验证系统能够模拟集群导弹面临的复杂电磁环境和多样化作战模式,并按照防空武器系统的典型作战过程,对集群导弹从发射直至命中的全过程进行较为全面的仿真;另一方面,通过试验验证能够及早发现

系统论证、设计过程中的缺陷,突破多弹协同制导策略、协同制导律等关键技术,确定航路规划算法、弹间协同数据链设计的正确性,加速制导控制系统的优化设计进程,提升多弹协同制导控制系统设计能力。

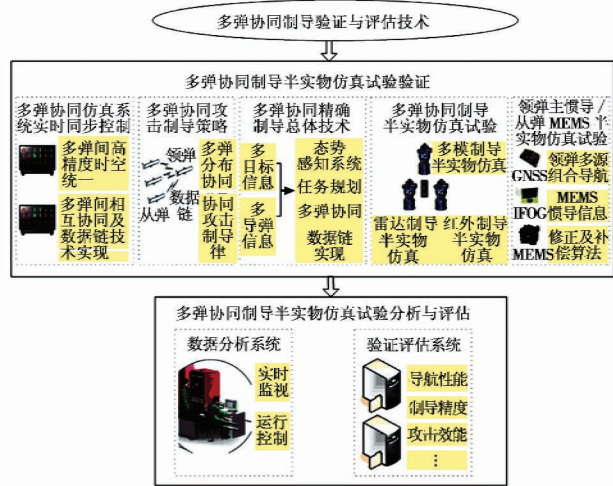


图5 多弹协同制导半实物仿真组成示意图
Fig.5 Schematic diagram of semi-physical simulation for multi-missile cooperative guidance

4 多弹协同技术的发展思考

多弹协同技术是防空导弹精确制导领域一个新兴的重要发展方向和研究前沿。作为一种创新性的体系作战方法,目前国内外对于多弹协同技术工程应用研究还处于起步与技术积累阶段,在大力开展多弹协同关键技术研究的同时,也应重视以下发展思路。

4.1 弹/平台一体化设计

由目标探测平台、导弹发射平台、网络指控中心和多弹共同组成一个作战体系,多弹协同是整个武器系统平台不可分割的一部分,空间、空中、海上及陆地等不同的目标探测平台、发射平台与导弹性能必须相互适应匹配,因此,多弹协同必须作为一个不可分割的整体而设计,并在机械/电气接口中留下改进和增长的潜力。导弹、发射平台以及探测平台综合一体化设计,是未来多弹协同技术工程应用所遵循的基本原则。

4.2 注重多用途、多功能设计

注重多用途、多功能设计是多弹协同的主要特征之一。面对复杂的作战环境,多弹协同可通过将空间、空中、海上及陆地等多个目标探测平台及发射平台单元组网,利用多个平台间的制导信息转移,形成无固定制导中心模式的作战样式,实现对隐身目标的探测^[10],也有利于复杂干扰环境下敌我对抗^[11],并且采用多平台协同制导后,通过中继平台可实现超视距制导,扩大跟踪、制导距离,扩大其杀伤远界;另外,多弹也可以采用激光、红外、雷达以及多模制导等不同体制

导引头装置,完成单枚导弹不可能完成的任务,显著提高导弹武器系统的抗干扰能力及拦截效能。

4.3 走模块化、低成本之路

多弹协同技术为导弹模块化设计和低成本研发创造了前提条件。一是更换不同的功能或结构模块就可以实现导弹改进改型,并使通用性和任务适应性增强,能缩短研制周期并节省研制费用;二是便于新技术的应用,如综合使用激光、雷达、红外、多模等不同的制导方式,协同互补地工作,提高对运动目标的识别、跟踪能力,还可适度降低末制导系统的难度,降低单枚导弹导引头的成本;另外,采用卫星导航、MEMS 惯性导航等简易导航设备,形成一种低成本精确制导导弹,并根据平台探测系统的信息、自身传感器的感知信息以及与其他导弹之间通过数据链进行信息的互联互通^[12],实现协同制导等作战手段,避免高价值精确制导导弹过多消耗,降低成本,获取最佳作战效益。

5 结束语

随着攻防技术、隐身技术、电磁和光电干扰技术的不断发展,未来多弹协同作战系统也在不断完善和进步,必将呈现出更多优点和良好前景。开展多弹协同作战系统的体系结构设计、协同策略、协同探测、导引控制、数据链、仿真验证等关键技术研究,有重大工程应用意义,为提高防空导弹武器在未来体系作战环境中的精确打击能力和作战效能提供了一种有效的作战途径,为推进导弹武器装备升级换代、促进防空导弹技术的发展奠定了技术基础。

(上接第50页)

何添加粗关联的步骤,其关键在于航迹中断后的门限设置;而且,应着重寻求针对弹道目标的、能应对目标机动的、中断时长较长的中断航迹关联方法。

参考文献

- [1] MUCCI R, ARNOLD J, BAR-SHALOM Y. Track segment association with a distributed field of sensors[J]. Acoustical Society of America, 1985, 78(4):1317-1324.
- [2] 杜渐,夏学知. 面向航迹中断的模糊航迹关联算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5):68-71, 76.
- [3] 齐林,王海鹏,熊伟,等. 基于先验信息的多假设模型中断航迹关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4):732-739.
- [4] 俞建国,刘梅,陈锦海. 弹道目标航迹片段关联及优化[J]. 航空学报, 2011, 32(10):1897-1904.
- [5] YEOM S W, KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Track segment association, fine-step IMM and initialization with Doppler for improved track performance[J]. IEEE Tran-

参考文献

- [1] 肖增博,雷虎民. 防区外多导弹协同突防复合制导研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(1):63-67.
- [2] LEE J I, JEON I S, THAK M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 13(1):301-310.
- [3] NATHAN H, BALAKRISHNAN S N. Impact time and angle guidance with sliding mode control[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, USA: AIAA, 2009:1-22.
- [4] 彭琛,刘星,吴森堂,等. 多弹分布式协同末制导时间一致性研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(10):1557-1561.
- [5] 王晓芳,郑艺裕,林海. 多导弹协同作战制导律研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(1):61-66.
- [6] 胡正东,林涛,张土峰,等. 导弹集群协同作战系统概念研究[J]. 飞航导弹, 2007(10):13-18.
- [7] 马培蓓,纪军. 多导弹三维编队控制[J]. 航空学报, 2010, 31(8):1660-1666.
- [8] 韦常柱,郭继峰,赵彪. 导弹协同作战编队飞行控制系统研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9):1968-1972.
- [9] 马培蓓,纪军,范作娥. 考虑战场环境约束的多导弹协同任务规划[J]. 电光与控制, 2010, 17(8):5-10.
- [10] 李刚,李大鹏,韦道知,等. 导弹导引头隐身技术研究[J]. 飞航导弹, 2014(1):64-68.
- [11] 汪朝群. 多传感器融合技术在导弹武器抗干扰中的作用[J]. 上海航天, 2000(5):51-55.
- [12] 王国田,王航宇,石章松. 美军舰空导弹协同制导技术及能力分析[J]. 上海航天, 2012(1):28-30.

sactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1):293-309.

- [6] 兰旭辉,熊家军,马建朝,等. 一种改进的多源异类航迹关联方法[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4):263-265.
- [7] ZADEH L A. A simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination[J]. Artificial Intelligence Magazine, 1986, 7(1):85-90.
- [8] HAENNI R. Are alternatives to Dempster's rule of combination real alternative? Comments on "About the belief function combination and the conflict management problem"[J]. Information Fusion, 2002, 3(4):237-239.
- [9] 邓勇,施文康,朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1):27-32.
- [10] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1):1-9.
- [11] 郭跃,刘新学,王才红. 混合坐标系下跟踪自由段弹道导弹的 IMM-UPF 算法研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(1):12-17, 23.