



多约束条件下的协同制导研究进展

摘要

协同制导是多导弹通过信息共享和分工合作,按照一定的控制策略共同完成攻击或防御任务的一种制导方式,是制导领域近年来重要的发展方向,也是未来自主作战的必然发展趋势.为了完成特定的制导任务,实现更好的制导效果,多约束条件下的协同制导的研究与应用显得尤为重要.本文针对多枚导弹协同作战的场景,综合论述了多种约束条件下的制导律的研究进展,包括攻击时间约束、攻击角度约束、视场角约束以及多约束综合考虑.最后,对协同制导领域的未来发展趋势做出了展望.

关键词

协同制导;多约束;多智能体系统;协同作战

中图分类号 V448.21;TP18

文献标志码 A

收稿日期 2020-06-15

资助项目 国家自然科学基金(61903017)

作者简介

张达,男,硕士生,主要研究方向为协同制导.17853143102@163.com

刘克新(通信作者),男,博士,副教授,主要研究方向为协同控制与协同制导.skxliu@163.com

0 引言

现代的作战环境日益复杂,作战任务愈发多样,任务目标更加智能且机动能力大大提高,部分目标甚至可以发射诱饵弹干扰来袭导弹的拦截,在这种情况下导弹既要完成对目标的识别又要完成高精度的攻击(拦截)、探测任务的难度显著提高.在这种趋势下,多弹协同作战的模式成为近年来的研究热点,而协同制导则是这种模式下的关键技术.多导弹协同制导是多个导弹在通信网络的支持下,相互配合,将多枚导弹融合成一个信息共享、功能互补、战术协同的作战群体^[1],按照一定的协同控制策略,使整个协同弹群实现某种攻击或防御的任务.多弹协同在协同拦截、协同探测和协同攻击等方面有广泛的应用并且有着各自的优势^[2].协同拦截可以扩大己方导弹的拦截区域,扩大弹群的有效毁伤空间,减小敌方目标机动突防的概率,还可以有效地实现弹群中不同导弹的分工合作,使得弹群中的一部分导弹可以为保护己方的高价值突防器对来袭导弹进行反拦截,从而提高己方高价值飞行器的生存概率和减小协同系统的控制能量消耗.另外,协同制导可以调制多导弹的编队构型,增强导弹的探测能力,多导弹可以通过弹上配备的红外传感器共享视线角信息从而对目标进行协同探测,这种探测方法相对于单一视线探测显著提高了导弹对目标机动的探测和估计能力,使得弹群可以更加精准地击中机动目标.最后,在一个协同攻击作战的弹群中,只有部分导弹配备有可以观测到目标相对运动信息的导引头,其他导弹仅配备基础制导控制部件,但是通过通信网络中信息的交换,所有导弹均可以实现既定的攻击任务,这种方案显著降低了作战成本,充分利用了通信网络的优势.

协同制导作为一种高效的打击和防御策略,在现代作战体系中的应用具有显著优势.大量学者广泛关注协同制导领域的相关研究,已取得众多开创性的研究成果.例如,Jeon等^[3]在比例导引律的基础上,将导弹之间剩余时间的误差项引入到导航比中,通过减小剩余时间的方差实现多导弹的协同制导.赵世钰等^[4]将协调变量、协调函数应用到协同制导的研究中,选择导弹的剩余时间作为协调变量,实现了多导弹的齐射攻击.张友安等^[5]在协同制导研究中引入了“Leader-Follower”的编队控制方式,定义了弹群中的领弹、被领弹的概念.赵启伦等^[6]在“领弹-被领弹”的模型下,利用多智能体二阶一致性算法对被领弹进行控制,从而实现了被领弹对领弹的跟踪,完成多导弹的协同制导任务.

1 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京,100191

2 北京航空航天大学 网络空间安全学院,北京,100191

从研究对象上来看,协同制导的研究主要分为两大类,一类是承担相同作战任务的多个导弹协同制导问题,在这类问题中每一个导弹的任务目标相同,另一类是“目标-导弹-防御器”的三体制导问题,与第一类问题的不同之处在于目标的任务是突破导弹的拦截,防御器的任务是拦截来袭的导弹从而保护目标,因此各个飞行器的制导目标不相同.在协同制导过程中,研究末制导下的多约束情况可以实现更加精准的高效打击,其中多约束条件主要有攻击时间约束、攻击角度约束、视场角度约束和多种约束综合考虑的情况.除此之外,导弹的脱靶量也是制导过程中不可或缺的基本约束.关于协同制导中的具体约束分类如图1所示.

现有的协同制导研究成果大多针对的是多导弹时间协同问题.时间协同分为独立寻的和协同寻的^[3],独立寻的是为每一个个体提前设定好协调参数,没有多导弹间的协调过程,本质上是一种一对一的制导方案,而协同寻的可以在制导的过程中实时协调各个导弹之间的关系,调节整个弹群的综合性能,是一种真正的多对一协同制导方案.通过攻击时间的协同,弹群可以实现对目标的饱和攻击,突破类似于 CIWS(Close-In Weapon System)的拦截,提高导弹对于目标的毁伤概率.多约束条件下的攻击角度约束是为了获得更好的打击效果,要求导弹以某一个角度击中目标,从而充分发挥导弹的毁伤性能.例如,鱼雷为了发挥定向聚能炸药的威力,需要垂直命中目标;钻地弹希望以接近 90°的角度接近地面;反坦克导弹希望以大落角对坦克顶部薄弱装甲实施攻顶^[7].在多弹的角度协同中,通过角度约束制导律设计可以实现弹群中的导弹从多个角度包围攻击目标.无论是时间约束还是攻击角度约束下的协同作

战,导弹都需要通过较大的机动调整导弹的弹道,在调整过程中会产生导弹的视场丢失目标的问题.在实际作战场景中,不同种类的导弹有不同大小的视场角限制,在机动过程中要保证目标一直位于导弹的视场范围内,否则当某一枚导弹丢失了目标,不仅影响该枚导弹击中目标,还会影响弹群中有信息交互的其他导弹命中目标.随着飞行器性能的提升,对于导弹轨迹的控制将进一步提高,综合考虑多种约束的需求也日益强烈,将攻击时间约束、攻击角度约束、视场角度约束同时考虑到多个导弹的协同制导过程中,会得到更加优良的制导效果,同样的,设计制导律的难度也会大大增加.本文将依照制导过程中不同的要求,分类讨论上述几种约束下协同制导问题的研究进展,并在此基础上展望未来发展前景.

1 协同制导模型和多智能体的基础知识

1.1 协同制导模型

为简化研究,协同制导模型大多采用运动学分析方法,并基于以下假设^[8]:

- 1) 导弹和目标的运动视为二维平面内的质点;
- 2) 导弹导引头相比制导回路响应足够快;
- 3) 每枚导弹的速度可控.

导弹与目标的相对几何关系如图2所示.

图2中 M_i 和 T 分别表示第 i 枚导弹和目标, r_i 表示 M_i 和 T 之间的弹目距离, q_i 表示 M_i 的视角, v_{mi} 和 v_i 分别表示 M_i 和 T 的速度, θ_{mi} 和 θ_i 分别表示 M_i 和 T 的弹道角, σ_{mi} 表示 M_i 的前置角, a_{mi} 和 a_i 分别表示 M_i 和 T 的法向加速度.其中, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为导弹总枚数.

由图2得到的 M_i 和 T 的相对运动方程如下:

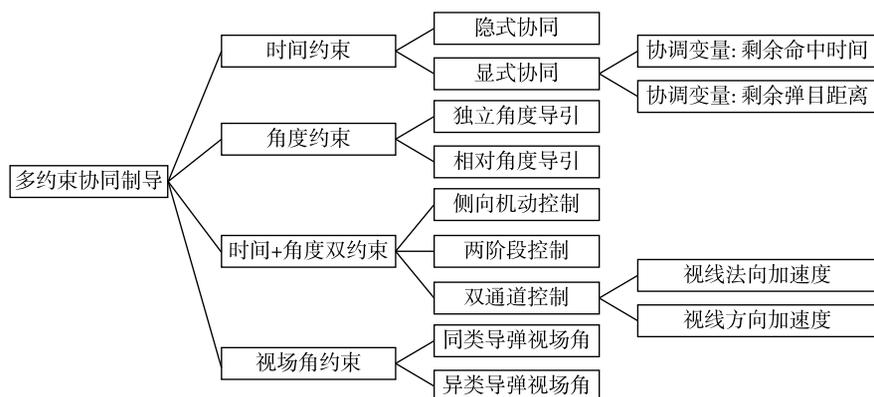


图1 多导弹的约束条件分类及控制方式

Fig.1 Constraint classification and control method of multiple missiles

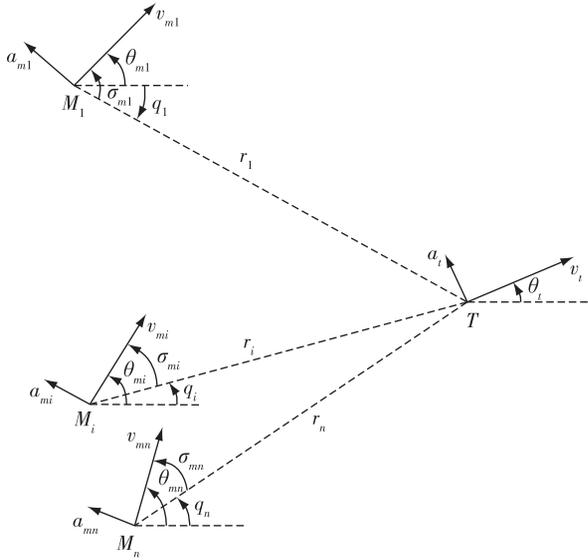


图2 多导弹平面交战示意图

Fig. 2 Multiple missiles planar engagement geometry

$$r_i = v_t \cos(q_i - \theta_t) - v_{mi} \cos(q_i - \theta_{mi}), \quad (1)$$

$$r_i \dot{q}_i = -v_t \sin(q_i - \theta_t) + v_{mi} \sin(q_i - \theta_{mi}), \quad (2)$$

$$\dot{\theta}_{mi} = \frac{a_{mi}}{v_{mi}}, \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_t = \frac{a_t}{v_t}. \quad (4)$$

1.2 多智能体的基础知识

在多导弹协同制导问题中,多导弹之间的通信拓扑关系采用图 $G(\mathbf{A}) = (v, \xi, \mathbf{A})$ 来描述,其中 v 描述节点组成的集合, ξ 表示节点之间的连线, 矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 表示权系数矩阵, 其中 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$. 若导弹 i 和导弹 j 之间能够进行信息交换, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 与第 i 个导弹存在边的联系的导弹所构成的集合, 称为导弹 i 的邻居, 表示为 $N_i = \{j | (i, j) \in \xi\}$.

2 多约束下的多导弹协同制导律

随着技术的发展,未来参与作战的飞行器将会变得更加智能化,机动策略也会更加复杂,面对这样先进的飞行器,单枚导弹命中概率低,攻击容易被拦截,多弹协同攻击是应对未来复杂的作战场景的有效方案.在多弹协同攻击的场景下,每一个飞行器的制导参数都需要配合整体弹群进行协调,从而通过整个导弹集群的统一调配实现协同任务.例如,对导弹的攻击时间和攻击角度进行控制,可以使得导弹集群在同一时间,沿着不同的方向对目标进行全方

位打击,从而提高对目标的毁伤概率.为了更加适应作战时的复杂场景,减小通信拓扑结构的变动,视场角度的引入对于提高整个制导系统的抗干扰性和稳定性具有重要作用.

反导技术的快速发展和目标机动能力的大大提高,对制导律的设计提出了更高的要求,科研人员期望所设计的制导律可以满足现实中的作战要求,实现理想的打击效果,因此多约束下的协同制导尤为重要.协同制导的多约束问题主要分为时间协同问题、攻击角度协同问题、多角度齐射问题,以及带有视场角度限制的多导弹协同问题.

2.1 多导弹的时间协同问题

目前,国内外在有时间约束的多导弹齐射攻击问题上主要分为两种方式.一是隐式协同,导弹之间没有信息交互,在发射前人为给每个导弹预定期望的攻击时间,这是一种开环的方式,从本质上而言是一种单枚导弹的制导问题.这种方法的优点是在攻击中考虑了导弹的具体特性,例如,法向过载限制、攻击角度限制、速度范围限制等,有利于弹道轨迹的协同,它的局限性是需要剩余时间的精确估计值,否则预定的时间过大或过小都会影响实际的制导效果^[9].二是显式协同,这种方法最大的特点是利用了多个导弹之间的信息交互,实现了一种闭环控制,这种方式不需要预定时间,各个导弹可以通过信息交互的方式使协调变量趋于一致.这类方式有分布式和全局式两种网络结构,全局式需要所有的导弹之间都可以信息交流,虽然信息全,但存在鲁棒性差和通信负担过大的问题,分布式只需要相邻导弹的信息,充分利用了网络的特点和优势,使得通信的代价和成本变低^[9].显式协同方式下协调变量主要有各导弹的剩余命中时间和各导弹的剩余弹目距离.当选取各导弹的剩余时间为协调变量,则通过协同制导律使各个导弹的剩余时间趋于一致,从而满足齐射攻击.剩余时间的精确值常常难以获得,因此常用它的估计值代替,它的两种常用估计方法如下:

$$\hat{t}_{go,i}^{(1)} = -\frac{r_i}{\dot{r}_i}, \quad (5)$$

$$\hat{t}_{go,i}^{(2)} = \frac{r_i}{V_{mi}} \left[1 + \frac{\sigma^2}{2(2N-1)} \right], \quad (6)$$

其中, $\hat{t}_{go,i}^{(1)}$, $\hat{t}_{go,i}^{(2)}$ 为 M_i 的剩余时间估计值, N 为导航系数.

式(5)计算方法只有在导弹和目标之间的相对接近速度近似为常值时精度较高,实际应用中限制

较大^[10-11].式(6)在估计时间的计算中考虑到小前置角的影响,增加了相关补偿项,从而提高了估计值的准确度,但当前置角较大时这种方法的准确度也会大幅下降^[3,11].

下面从多导弹间协同方式的不同介绍关于时间协同的发展现状.

2.1.1 隐式协同

Jeon 等^[12]对反舰导弹提出了指定飞行时间的制导律(Impact-Time-Control Guidance, ITCG),该制导律是由经典的比例导引律和时间误差的反馈项组成的,率先解决了单枚导弹制导中的时间约束问题,也成为了后续分布式制导体系的底层制导律.为了尽可能获得精确的导弹剩余时间估计值,也发展出了一系列基于补偿弹道曲率方式的剩余时间估计方法^[13-15],完善了单枚导弹在隐式时间协同方面的研究.

2.1.2 显式协同

显式协同方法无论在静止还是机动目标的场景下均可以实现多导弹间的协同.林德福等^[16]针对静止的目标提出了一种基于领弹-从弹架构的分布式协同制导方案,虚拟领弹为部分从弹提供期望的攻击时间信息,从弹制导律由比例导引律结合邻居导弹的时间误差偏置项组成.张曦等^[17]为了避免对攻击时间的估计,选取 $x_i = [r_i, \sigma_{mi}]^T$ 为一组状态变量对从弹利用网络同步式原理并结合可靠性更高的 De Bruijn 网络构建的通信拓扑结构实现了协同攻击.He 等^[18]采取了一种两阶段控制的协同制导方案,在第一阶段通过分布式网络控制每个导弹的剩余距离和前置角趋于一致,为第二个阶段的纯比例导引提供相同的剩余距离和前置角,该制导律同样避免了对攻击时间进行估计.上述研究均针对静止的目标,但在实际情况中,目标往往具备一定的机动性,因此上述制导律会产生较大的过载和脱靶量,导致制导效果并不理想.针对机动目标的协同制导问题,董晓飞等^[19]通过将非线性的制导模型反馈线性化,用状态观测器估计目标的机动并在制导律中进行相应补偿,将协同制导问题转化为一致性问题,从而实现了多导弹在有向拓扑结构下的同时攻击.毛昱天等^[20]设计的制导律由可以拦截机动目标的增强型比例导引律和邻接导弹间的协同导引律组成,在非线性制导模型的框架下根据分布式网络同步一致性原理实现了导弹集群的同时攻击,具有局部通信和分布式计算的特点.Zhai 等^[21]根据分布式协同

协议设计的协同制导律使得视线方向的加速度趋近于零,从而可以精确地计算出各导弹的剩余时间,并结合时变终端滑模控制消除滑模面的奇异和抖振,实现了各导弹的协同攻击.

2.2 多导弹的角度协同问题

对于制导系统来说,它的主要目的是产生合适的制导律使得末端脱靶量为零,但在某些场景下,仅仅控制脱靶量是不足以完成制导任务的,导弹在攻击目标时还需要以特定的角度打击目标.多导弹关于角度的协同攻击可以分为独立角度导引和相对角度导引.独立角度导引常见于变结构控制^[22]中,每一枚导弹按预定的绝对攻击角度命中目标,而相对角度导引常见于最优控制^[23-28]和微分对策控制^[29-30]中,每一枚导弹需要与其他导弹形成一定大小的相对角度,从而在末制导阶段形成一个特定的相对拦截态势.

2.2.1 独立角度导引

由于滑模变结构控制能够克服系统的不确定性,对于外界干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性,并且结构简单、响应速度快,非常适合于制导律的设计.文献[22]分别针对静止、常速和机动的目标设计了滑模制导律,使得飞行器即使在初始方向误差较大的情况下也可以以指定的视线角攻击目标.对于变结构制导律的设计,滑模面的选择决定了制导性能,包括收敛速度、稳定性等特性,滑模面的选择通常为以下两种^[22],一种是传统的线性滑模面:

$$s = \dot{x} + cx, c > 0, \quad (7)$$

一种是终端滑模面:

$$s = \dot{x} + c|x|^{\alpha}\text{sign}(x), c > 0, 0 < \alpha < 1. \quad (8)$$

第一种滑模面实现 $s=0$ 时, x 渐近收敛于 0, 不能实现有限时间收敛,而后一种终端滑模控制算法可以实现 $s=0$ 时, x 可以在有限时间收敛,即导弹在有限时间内实现拦截并达到特定的视线角.变结构控制方法的后续工作主要是发展可以消除滑模过程中的奇异和抖振现象的非奇异终端滑模算法,实现更加稳定的制导律设计.

2.2.2 相对角度导引

在具有相对拦截角度约束的多导弹协同攻击研究中应用最为广泛的是最优制导律方法,其思想是将具有终端约束的协同制导问题转化为带有两点边值的矩阵微分方程的求解问题.最优控制应用于非线性的制导系统需要制导系统沿导弹、目标、拦截点组成的碰撞三角形进行线性化,从而在线性系统层

面上对问题进行解决.文献[23]针对两枚导弹攻击一个目标的场景,基于最优控制为两枚导弹施加了一个相对拦截角度($\theta_{mi}-\theta_{mj}$)的约束,实现了拦截导弹以一个相对的几何形状拦截目标.文献[24]在文献[23]的基础上,将拦截弹由两枚扩展成多枚,使导弹两两之间以某一特定角度拦截机动目标,并获得了导弹制导律的闭环解析解,实现了多枚导弹之间拦截角度的协同.在多飞行器对目标的制导过程中,飞行器对于目标状态的探测效能会受到飞行器相对构型的影响,如果一对拦截器与目标的视线分离角越小,探测误差就会越大^[25].文献[26]中两个带有红外传感器的拦截器利用双视线测量方法探测目标的状态,通过协同制导增大两个拦截器之间的视线分离角(q_i-q_j),从而增强拦截器对目标的探测效果.文献[25]在文献[26]的基础上提出了一种制导探测一体化的设计方法,在制导设计中引入视线分离角从而调制协同探测几何构型,在制导全程中增强探测效果.

在多飞行器协同制导中,包含“目标-导弹-防御器”的三体制导问题是一项重要的研究内容.相较于单一的飞行器突防,目标与防御器组成的防御团体协同合作能够显著增大反拦截概率.文献[27]采用了目标飞行器协同一枚防御器突防的方案,基于最优控制思想选取防御器的拦截角度、脱靶量和控制能量为参数的目标函数,并解决了有限时间收敛的问题.文献[28]在文献[27]的基础上扩充了防御器的数量,并在拦截末端为两枚防御器施加相对拦截角度的约束,目标既可以独立导引也可以作为诱饵实现防御团体内的显式协同,在仿真中可以发现显式协同相比目标独立导引的方式明显减小了防御器的能量输入,可以实现更小的能量消耗.最优控制虽然可以实现导弹集群以相对的拦截角度精准地命中目标,但是最优控制需要导弹集群可以获得目标准确的机动参数,这在实际的作战环境中往往是难以实现的,因此微分对策思想的引入可以使得导弹在目标机动未知的情况下仍然可以实现对目标的精确命中.微分对策思想中导弹与目标、防御器之间的关系可视为博弈的双方,此时三体制导问题可以转化为追踪-逃逸模型.文献[29]针对一枚具有终端拦截角度约束的导弹进行研究,将导弹和目标视为博弈的双方,采用了零和微分对策原理,实现了导弹对目标的脱靶量和碰撞角度的要求.文献[30]针对博弈的三方提出了系统动态的解析解,单枚导弹在减小

脱靶量的同时与其他导弹构成角度上的协同关系,目标和防御器构成的协同集群在最小化目标函数的同时,导弹也在最大化目标函数,这样的微分对策制导律更加有利于对机动目标的拦截.

2.3 多导弹的多角度齐射问题

多导弹实现对目标的全方位饱和攻击需要两个要求,其一是时间协同,其二是角度协同.在作战中对多导弹末制导阶段同时实施时间和角度的约束是实现精确制导的一个重要方向,在空间交汇对接、无人机航母着陆、制导武器精确打击目标等领域有广泛的应用场景^[31],国内外在这一领域也取得了不少的成果.多导弹的多角度齐射问题的解决方案主要分为侧向机动控制(基础制导律结合偏置项)、两阶段控制、视线坐标系下的法向和切向控制.

2.3.1 侧向机动控制

侧向机动控制是对导弹垂直于速度的方向施加一个控制量,从而满足时间和角度的要求.文献[32]将攻击角度和攻击时间的约束偏置项加到了纯比例导引律中,并详细讨论了制导律系数的选取,保证了弹群可以以指定的时间和角度击中目标.文献[16]中的制导律由剩余时间加权的最优落角约束制导律^[33]和调节攻击时间的偏置项组成,只要部分导弹可以接收到虚拟领弹的信息,弹群就可以完成带有角度和时间约束的攻击任务.文献[34]阐述了拦截角度的分配策略,按照飞行器之间的拦截时间差最小且整体到达时间最短的指标分配各个飞行器的拦截角度,采用最优控制方法求得带有角度约束的最优制导律,并结合通过一致性算法获得的带有时间约束的偏置项,完成了多导弹的制导系统设计.

2.3.2 两阶段控制

两阶段控制是将制导的过程分为实现不同目的的两个阶段,通过切换控制量实现对多导弹的多约束控制.文献[35]针对静止目标提出了一种两阶段控制策略,第一阶段将导弹的攻击时间控制转化为对理想弹目距离的跟踪,并在此阶段对攻击角度进行粗略控制,使导弹在预定的攻击角度附近做小幅度机动,第二阶段则运用滑模控制对攻击角度进行精确控制.由于第一阶段的角度粗略控制使得第二阶段对于时间的影响较小,因此可以实现对攻击角度和时间的双重约束.文献[36]针对机动目标提出了两阶段控制方案,在飞行前段基于滑模控制理论设计了时间可控的协同制导律,在攻击末段基于有限时间理论设计了终端角度约束的制导律.文献

[37]借鉴了文献[35]的两阶段控制思想,并由二维平面发展到三维空间内,第一个阶段采用切换滑模思想对导弹的纵向通道进行控制,横向通道则采用比例导引,第二个阶段采用最优控制完成对攻击角度的精确控制。

2.3.3 双通道控制

在多角度齐射问题中,多导弹的弹道需要同时满足攻击时间和攻击角度的约束,因此大多文献采用在导弹-目标的视线坐标系下通过设计导弹沿视线方向的加速度和沿视线法向的加速度满足要求。沿视线方向上的加速度可以协调导弹之间命中目标的时间,沿视线法向上的加速度则可以使导弹以某一角度精准地命中目标。文献[38]在视线方向和法向的两个方向均设计了二阶滑模控制器使系统的动态在积分滑模面上,可以减小由于目标的机动带来的干扰,并采取一致性控制协议使各个导弹同时以指定的角度命中目标。文献[39]基于导弹与目标之间的接近速度变化率较小的假设,忽略了目标在视线方向上的加速度分量,由此在视线方向利用有限时间一致性理论可以保证多导弹同时攻击;在视线的法向,考虑了目标机动带来的干扰设计了非齐次干扰观测器并选取了线性滑模面使得导弹按照一定的角度命中目标。文献[40]弥补了文献[39]在视线方向未考虑目标机动的情况,采取了自适应控制估计目标机动的干扰,从而实现了更加精确的时间控制。文献[41]针对高超声速目标设计了一种同时满足角度和时间约束的制导律,在视线方向放弃了利用剩余时间作为协调变量,而采用弹目距离作为协调变量,利用二阶多智能体一致性算法保证了时间的统一;在视线法向选取了非奇异终端滑模面进行控制,这使得视线角和视线角速率可以在有限时间内达到期望值。为了加快时间达成一致的速度,文献

[42]在视线方向引入了自适应超螺旋算法,可以实现快速收敛的作用。文献[43]在沿视线法向方向上设计的自适应非奇异快速终端滑模制导律结合有限时间收敛的干扰观测器实现了视线角和视线角速率的快速稳定的收敛,相比其他的有限时间控制具有更强的鲁棒性。文献[44]在分布式通信的基础上实现了多个导弹在有限时间内达成攻击时间的一致性和视线角的收敛,制导律中的状态信息导引头均可测到且不需要目标机动的信息,符合工程上的要求。文献[45]同时考虑到有向拓扑结构、无导弹-目标径向速度测量、带视线角约束、打击机动目标和有限时间协同,控制了多导弹同时以不同的角度攻击目标,并且通过仿真实验验证了制导律的有效性。

2.4 带有视场角限制的多约束问题

在末制导阶段,导弹制导过程会产生较大机动,这可能会导致装有红外导引头或捷联式导引头的导弹失去对于目标的锁定,从而导致导弹无法正常攻击目标^[46]。通常导弹在末制导阶段迎角较小,可忽略不计,因此可定义导弹的前置角即为导弹的视场角,导弹的视场范围通常为导弹面前的扇形区域,如图3所示。

为了有效地实现末制导的特定攻击任务,针对带有攻击时间和攻击角度的多约束问题,发展出带有视场角限制的制导律,弥补了导弹自身性能对协同制导过程带来的限制。文献[47]针对带有视场角约束的以某一特定角度攻击目标的问题,提出了一种三阶段制导律,但是由于需要逻辑转换会导致控制量的跳变等问题,会影响飞行过程中的稳定性。为了解决控制量的连续性问题,文献[48]同时考虑了攻击角度和视场角的限制,通过设计的时变的滑模面和时变障碍 Lyapunov 函数获得的趋近率实现了

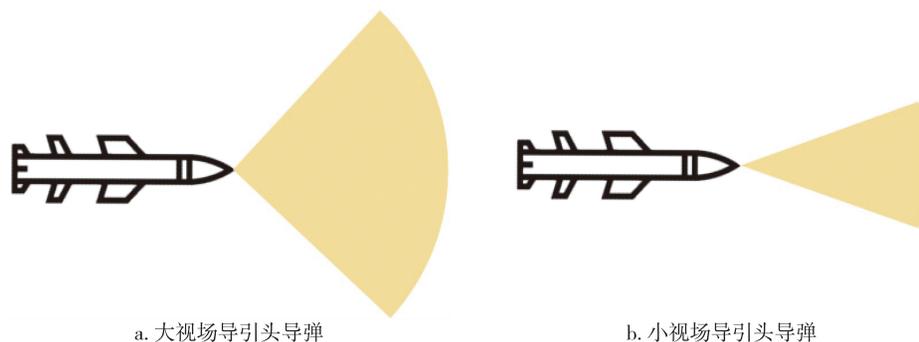


图3 搭载不同导引头的导弹

Fig. 3 Missiles with different homing heads

零脱靶量和攻击角度的零误差,并且可以确保目标自始至终位于导弹的视场之内.文献[49]设计了一种自适应终端滑模面和新的 Lyapunov 障碍函数,可以实现制导系统的状态变量在有限时间内快速收敛到零.由于是将视场角转化为弹目趋近速度考虑,因此没有分阶段控制,避免了控制量的跳变.上述制导律的设计只针对单枚导弹的情形,现代作战往往需要多个导弹之间的协同,因此多个导弹之间在视场角限制下的协同制导设计尤为重要.文献[46]针对机动目标设计了一种两阶段协同制导律,在第一个阶段控制导弹飞行的时间和视场角限制,提出了一种带有时间约束的偏置比例导引律,在第二个阶段控制导弹的攻击角度和视场角,设计了有限时间滑模制导律.文献[50]关注了导弹之间的通信联系,提出导弹之间的通信需要依靠通信天线,因此需要对导弹之间的相对视角进行控制,导弹之间相对视角描述如图4所示.该文献提出了一种协同制导律,在不干扰拦截任务的前提下,减小两枚追逐同一机动目标的导弹相对视角的变化,以保证正常通信.采用线性二次型最优控制讨论了在固定天线角度和可操纵天线的情况下的最优控制量.对于某一弹群来说,导弹的来源广泛,由于承担的任务不同,弹群中的角色不同,不同的导弹都会有不同的视场角约束,因此针对视场角约束下异类导弹的协同制导研究有着重要的实际意义.文献[51-52]针对具有相同的视场角约束的多导弹提出了满足攻击时间和攻击角度的协同制导律,并且各导引头的视场角度较大.文献[53]考虑到带有不同视场角约束的多导弹齐射问题,通过反馈线性化将齐射问题转化为制导系统的状态一致性问题,弹群中导弹仅需要通过拓扑网络交换剩余距离信息就可实现状态的一致收敛,当各导弹的状态变量收敛一致后导弹之间的通信网络会断开采用独立导引律至命中目标.

3 总结

多约束条件下多导弹的协同制导问题有着广泛的应用前景,例如军事、航空等方面,受到了国内外学者的广泛关注.单个导弹的多约束制导问题的研究已经比较成熟,在攻击时间、攻击角度、视场限制和控制量约束等方面有了长足的进步,实现了单体的精确制导.但对于多导弹在多约束条件下的协同制导目前还没有形成完善的体系,且协调方式较为单一,因此协同制导这一领域未来会有广阔的发展

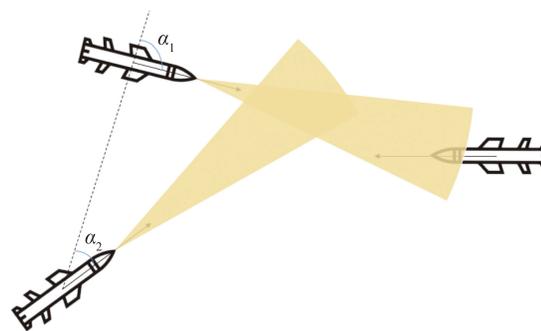


图4 导弹之间的相对视角
(导弹的速度矢量与另一导弹的视线之间的夹角)

Fig. 4 Look angle between missiles (the angle between the velocity vector of a missile and the line of sight to the other missile)

空间.

1) 目前,在多导弹时间协同方面大多选取导弹的剩余时间作为协调变量,但是对于导弹剩余时间的估计方法较为简单,不能保证对机动目标剩余时间估计的准确性.因此,以一个不精确的剩余时间估计值作为协调变量,可能会导致导弹最终不能以同一时间攻击到目标,甚至有些导弹需要做出较大机动来实现“等待”.未来可以针对机动目标选取更加准确的剩余时间计算方法,从而对时间协同进行改进.

2) 在多弹的通信拓扑网络中,弹群之间可以通过集中式或分布式的通信达成时间的一致性,这种方式充分利用了弹群之间的通信连接,实现了显式协同.但对于攻击角度、视场角度等约束下的协同制导问题,研究工作大多局限于设计导弹的本地导引律层面,未能利用多导弹之间的通信达成显式协同.因此未来可以考虑对导弹的角度分配设计一个优化指标,从而可以动态地为每个导弹分配一个最优的角度,完成相应的作战任务.

3) 目前,无论是单个导弹的制导律设计还是多导弹的协同制导大多考虑在二维平面上,但实际上导弹-目标的打击场景是位于三维空间内的,每个导弹都有两个甚至三个控制通道,控制通道之间的耦合关系造成了三维空间内的协同制导情况较为复杂,考虑多个导弹的多约束情况的研究较少.

4) 在多导弹的一致性控制研究中如何防止导弹之间的相互碰撞也是未来需要解决多弹多约束问题的一个方面.

参考文献

References

- [1] 赵建博,杨树兴.多导弹协同制导研究综述[J].航空学报,2017,38(1):22-34
ZHAO Jianbo, YANG Shuxing. Review of multi-missile cooperative guidance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 22-34
- [2] 魏明英,崔正达,李运迁.多弹协同拦截综述与展望[J/OL].航空学报:1-10[2020-06-24].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20200115.1759.002.html
WEI Mingying, CUI Zhengda, LI Yunqian. Review and prospect of multi-missile coordinated interception [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-10 [2020-06-24]. http: // kns. cnki. net/kcms/detail/11.1929.v.20200115.1759.002.html
- [3] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(1): 275-280
- [4] 赵世钰,周锐.基于协调变量的多导弹协同制导[J].航空学报,2008,29(6):1605-1611
ZHAO Shiyu, ZHOU Rui. Multi-missile cooperative guidance using coordination variables [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1605-1611
- [5] 张友安,马国欣,王兴平.多导弹时间协同制导:一种领弹-被领弹策略[J].航空学报,2009,30(6):1109-1118
ZHANG You'an, MA Guoxin, WANG Xingping. Time-cooperative guidance for multi-missiles: a leader-follower strategy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1109-1118
- [6] 赵启伦,陈建,董希旺,等.拦截高超声速目标的异类导弹协同制导律[J].航空学报,2016,37(3):936-948
ZHAO Qilun, CHEN Jian, DONG Xiwang, et al. Cooperative guidance law for heterogeneous missiles intercepting hypersonic weapon [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 936-948
- [7] 孙胜,张华明,周荻.末端导引律综述[J].航天控制,2012,30(1):86-96
SUN Sheng, ZHANG Huaming, ZHOU Di. A survey of terminal guidance law [J]. Aerospace Control, 2012, 30(1): 86-96
- [8] Zhao J, Zhou R. Unified approach to cooperative guidance laws against stationary and maneuvering targets [J]. Non-linear Dynamics, 2015, 81(4): 1635-1647
- [9] 杨剑影,周佳玲,魏小倩.多导弹攻击高机动目标的分布式协同制导关键技术[J].航空兵器,2017(3):3-12
YANG Jianying, ZHOU Jialing, WEI Xiaoqian. Key technologies of distributed cooperative guidance and control method for multiple missiles attacking the maneuvering target [J]. Aero Weaponry, 2017(3): 3-12
- [10] Zarchan P. Tactical and strategic missile guidance [M]. 6th Ed. Washington, DC: AIAA, Inc., 2012
- [11] Zhou J L, Yang J Y. Distributed guidance law design for cooperative simultaneous attacks with multiple missiles [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2016, 39(10): 2439-2447
- [12] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266
- [13] 陈升富.导弹攻击时间控制制导律研究[D].南京:南京理工大学,2019
CHEN Shengfu. Investigation on impact time control guidance laws for missiles [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019
- [14] Dhananjay N, Ghose D. Accurate time-to-go estimation for proportional navigation guidance [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2014, 37(4): 1378-1383
- [15] Ghosh S, Ghose D, Raha S. Unified time-to-go algorithms for proportional navigation class of guidance [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2016, 39(6): 1188-1205
- [16] 林德福,何绍溟,王江,等.基于虚拟领弹-从弹的集群分布式协同制导技术研究[J].中国科学:技术科学,2020,50(5):506-515
LIN Defu, HE Shaoming, WANG Jiang, et al. On virtual leader-follower-based distributed cooperative swarm guidance strategy [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(5): 506-515
- [17] 张曦,水涌涛,刘涛,等.具有高可靠性弹间通讯的多弹协同打击制导策略[J].战术导弹技术,2019(1):94-99
ZHANG Xi, SHUI Yongtao, LIU Tao, et al. Cooperative guidance strategy for multi-missile with high reliability communication [J]. Tactical Missile Technology, 2019(1): 94-99
- [18] He S M, Wang W, Lin D F, et al. Consensus-based two-stage salvo attack guidance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3): 1555-1566
- [19] 董晓飞,任章,池庆玺,等.有向拓扑条件下针对机动目标的分布式协同制导律设计[J/OL].航空学报:1-10[2020-06-24].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200117.1654.002.html
DONG Xiaofei, REN Zhang, CHI Qingxi, et al. Distributed cooperative guidance for maneuvering targets with directed communication topologies [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-10 [2020-06-24]. http: // kns. cnki. net/kcms/detail/11.1929. V. 20200117. 1654. 002. html
- [20] 毛昱天,杨明,张锐.多导弹系统协同攻击机动目标分布式制导律[J].导航定位与授时,2018,5(3):41-46
MAO Yutian, YANG Ming, ZHANG Rui. Distributed cooperative guidance law for multi-missile systems attacking maneuvering target [J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(3): 41-46
- [21] Zhai S, Wei X Q, Yang J Y. Cooperative guidance law based on time-varying terminal sliding mode for maneuvering target with unknown uncertainty in simultaneous attack [J/OL]. Journal of the Franklin Institute, 2019 [2020-06-24]. https: // www. sciencedirect. com/ science/ article/ abs/ pii/ S0016003219309056
- [22] Kumar S R, Rao S, Ghose D. Sliding-mode guidance and control for all-aspect interceptors with terminal angle constraints [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics,

- 2012, 35(4): 1230-1246
- [23] Shaferman V, Shima T. Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-4909
- [24] Shaferman V, Shima T. Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2015, 38(8): 1395-1408
- [25] 张帅, 郭杨, 王仕成. 考虑探测构形的多飞行器协同探测与制导一体化设计 [J]. *宇航学报*, 2018, 39(4): 401-410
ZHANG Shuai, GUO Yang, WANG Shicheng. Integrated design of multi-aircraft cooperative detection and guidance considering the detection configuration [J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(4): 401-410
- [26] Liu Y F, Qi N M, Shan J J. Cooperative interception with double-line-of-sight-measuring [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-5112
- [27] 张帅, 郭杨, 王仕成. 带有引诱角色的有限时间协同制导方法 [J]. *宇航学报*, 2018, 39(3): 308-317
ZHANG Shuai, GUO Yang, WANG Shicheng. Finite time cooperative guidance method with a lure role [J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(3): 308-317
- [28] 王少博, 郭杨, 王仕成, 等. 带有引诱角色的多飞行器协同最优制导方法 [J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 288-302
WANG Shaobo, GUO Yang, WANG Shicheng, et al. Cooperative optimal guidance method for multi-aircraft with luring role [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 288-302
- [29] 花文华, 刘杨, 陈兴林, 等. 具有终端约束的线性二次型微分对策制导律 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(12): 1448-1455
HUA Wenhua, LIU Yang, CHEN Xinglin, et al. Linear quadratic differential game guidance law with terminal constraints [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12): 1448-1455
- [30] 花文华, 张拥军, 张金鹏, 等. 双导弹拦截角度协同的微分对策制导律 [J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(6): 838-844
HUA Wenhua, ZHANG Yongjun, ZHANG Jinpeng, et al. Differential game guidance law for double missiles with cooperative intercept angle [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(6): 838-844
- [31] 李庆春, 张文生, 韩刚. 终端约束条件下末端制导律研究综述 [J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(1): 1-12
LI Qingchun, ZHANG Wensheng, HAN Gang. Review of terminal guidance law with terminal constraints [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(1): 1-12
- [32] 王晓芳, 林海. 多约束条件下导弹协同作战制导律 [J]. *弹道学报*, 2012, 24(3): 59-64
WANG Xiaofang, LIN Hai. A guidance law for multiple missiles combating cooperatively under multiple constraints [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(3): 59-64
- [33] Ryoo C K, Cho H, Tahk M J. Time-to-go weighted optimal guidance with impact angle constraints [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(3): 483-492
- [34] 王利国, 马国欣, 矫永康. 带角度约束的多飞行器编队协同拦截制导律设计 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2018, 33(3): 289-296
WANG Ligu, MA Guoxin, JIAO Yongkang. Cooperative interception guidance law design for multi-aircrafts formation with angular constraints [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2018, 33(3): 289-296
- [35] 张友安, 张友根. 多导弹攻击时间与攻击角度两阶段制导 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, 40(5): 1442-1447
ZHANG You'an, ZHANG Yougen. Two stages guidance to control impact time and impact angle for multi-missiles [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(5): 1442-1447
- [36] 惠耀洛, 南英, 陈哨东, 等. 带末端角度约束的多导弹协同制导律设计 [J]. *弹道学报*, 2015, 27(3): 41-46
HUI Yaoluo, NAN Ying, CHEN Shaodong, et al. Cooperative guidance law for multiple missiles with terminal impact angle constraint [J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(3): 41-46
- [37] 李新三, 汪立新, 范小虎, 等. 导弹撞角角度与飞行时间两阶段控制制导律 [J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(6): 6-11
LI Xinsan, WANG Lixin, FAN Xiaohu, et al. Two-stage control guidance of missile impact angle and flight time [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(6): 6-11
- [38] 史震, 何晨迪, 郑岩. 攻角约束下的二阶滑模控制器的协同制导律设计 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 111-118
SHI Zhen, HE Chendi, ZHENG Yan. Cooperative guidance law design with impact angle constraint based on second-order sliding mode controller [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 111-118
- [39] 宋俊红, 宋申民, 徐胜利. 带有攻击角约束的多导弹协同制导律 [J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(4): 554-560
SONG Junhong, SONG Shenmin, XU Shengli. Cooperative guidance law for multiple missiles with impact angle constraints [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(4): 554-560
- [40] 宋俊红, 宋申民, 徐胜利. 一种拦截机动目标的多导弹协同制导律 [J]. *宇航学报*, 2016, 37(12): 1306-1314
SONG Junhong, SONG Shenmin, XU Shengli. A cooperative guidance law for multiple missiles to intercept maneuvering target [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(12): 1306-1314
- [41] 谭诗利, 雷虎民, 王斌. 高超声速目标拦截含攻击角约束的协同制导律 [J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(6): 597-602
TAN Shili, LEI Humin, WANG Bin. Cooperative guidance law for hypersonic targets with constrained impact angle [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2019, 39(6): 597-602
- [42] Tian Y, Cai Y L. A cooperative guidance law for multiple

- missiles with impact time and terminal angle constraints [C] // 2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2019:1504-1510
- [43] Zhang M J, Ma J J, Han Y. Fixed-time cooperative guidance law for multiple missiles against maneuvering target[C] // 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018:3848-3853
- [44] 吕腾,吕跃勇,李传江,等.带视线角约束的多导弹有限时间协同制导律[J].兵工学报,2018,39(2):305-314
LÜ Teng, LÜ Yueyong, LI Chuanjiang, et al. Finite time cooperative guidance law for multiple missiles with line-of-sight angle constraint[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(2):305-314
- [45] 吕腾,李传江,郭延宁,等.有向拓扑下无径向速度测量的多导弹协同制导[J].宇航学报,2018,39(11):1238-1247
LÜ Teng, LI Chuanjiang, GUO Yanning, et al. Cooperative guidance without radial velocity measurement for multiple missiles under directed topologies[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(11):1238-1247
- [46] 史绍琨,赵久奋,尤浩.带视场角约束的导弹协同攻击两阶段制导律[J].战术导弹技术,2019(6):82-90
SHI Shaokun, ZHAO Jiufen, YOU Hao. Two stages guidance law for multiple missiles cooperative attacking with field-of-view constraint[J]. Tactical Missile Technology, 2019(6):82-90
- [47] 黄洁,张友安,刘永新.一种有撞角和视场角约束的运动目标的偏置比例导引算法[J].宇航学报,2016,37(2):195-202
HUANG Jie, ZHANG You'an, LIU Yongxin. A biased proportional guidance algorithm for moving target with impact angle and field-of-view constraints[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(2):195-202
- [48] Wang X L, Zhang Y A, Wu H L. Sliding mode control based impact angle control guidance considering the seeker's field-of-view constraint [J]. ISA Transactions, 2016, 61:49-59
- [49] 李晓宝,赵国荣,刘帅,等.考虑攻击角度和视场角约束的自适应终端滑模制导律[J/OL].控制与决策:1-10 [2020-06-24]. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0058
LI Xiaobao, ZHAO Guorong, LIU Shuai, et al. Adaptive terminal sliding mode guidance law with impact angle and field-of-view constraints[J/OL]. Control and Decision:1-10 [2020-06-24]. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0058
- [50] Balhance N, Weiss M, Shima T. Cooperative guidance law for intrasalvo tracking [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2017, 40(6):1441-1456
- [51] Wang X L, Zhang Y A, Wu H L. Distributed cooperative guidance of multiple anti-ship missiles with arbitrary impact angle constraint [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 46:299-311
- [52] Zhang Y A, Wang X L, Wu H L. A distributed cooperative guidance law for salvo attack of multiple anti-ship missiles [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(5):1438-1450
- [53] 叶鹏鹏,张蛟,李银伢,等.带有不同视场约束的多导弹分布式协同制导[J].兵工学报,2019,40(3):506-515
YE Pengpeng, ZHANG Jiao, LI Yinya, et al. Distributed cooperative guidance of multiple missiles with heterogeneous constraints of field-of-view[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3):506-515

Recent advances of cooperative guidance under multiple constraints

ZHANG Da¹ LIU Kexin¹ LI Guofei²

¹ School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191

² School of Cyber Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191

Abstract Cooperative guidance is a kind of guidance method that multiple missiles accomplish attack or defense tasks cooperatively according to a certain control strategy through information sharing and division of work. It is an important direction in the guidance field in recent years and an inevitable development trend for autonomous combat in the future. In order to complete the specific guidance task and achieve better guidance effect, the research and application of cooperative guidance under multiple constraints is particularly important. This paper comprehensively discusses the research progress of the guidance law under the condition of multiple constraints in the scenario of cooperative combat, including the attack time constraint, attack angle constraint, field of view angle constraint, and multi-constraint comprehensive consideration. Finally, the future development trend in the field of cooperative guidance is prospected.

Key words cooperative guidance; multiple constraints; multi-agent systems; cooperative combat