

多导弹时间协同分布式导引律设计

马国欣^{1,2}, 张友安¹

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 93132 部队, 黑龙江 齐齐哈尔 161016)

摘要: 为了实现多导弹协同攻击同一目标, 提出一种时间协同分布式导引律设计方法, 该方法对于无角度约束和有角度约束的情况均适用. 首先, 以各导弹子系统作为网络同构节点建立了多导弹时间协同制导模型, 该模型以各导弹剩余时间信息附加预定偏置量为输出; 然后, 以调整子系统间输出误差为目的, 设计了系统的分布式控制方案, 并结合一般协同控制系统的收敛性条件, 分析了导弹寻的导引的特殊性, 给出了保证多导弹时间协同的通信拓扑条件; 最后, 通过仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 协同控制; 导弹; 制导系统; 角度约束; 导引律

中图分类号: TJ765

文献标志码: A

Time-cooperative distributed guidance law design for multi-missiles

MA Guo-xin^{1,2}, ZHANG You-an¹

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001; 2. Unit 93132, PLA, Qiqihar 161016, China. Correspondent: MA Guo-xin, E-mail: ma_guoxin@163.com)

Abstract: To achieve the cooperative attack against a same target for multi-missiles, an approach to design the time-cooperative distributed guidance law is proposed, which is applicable to the situation with or without angular constraint. With each missile subsystem as a homogeneous network node, the time-cooperative guidance model for multi-missiles is built, which takes each missile's time-to-go plus designated bias as the outputs. The distributed control scheme of the system is designed to reduce the difference among the outputs of subsystems. The communication topology condition to guarantee the time-cooperativeness of multi-missiles is given by analyzing the features of the homing guidance of missile with consideration of the convergence condition of the general cooperative control system. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: cooperative control; missiles; guidance system; angular constraint; guidance law

0 引言

多导弹齐射攻击中的攻击角度控制技术和攻击时间控制技术已受到越来越多研究者的关注. 攻击角度控制导引律能够实现指定方向的攻击, 这类导引律的设计可以通过修正比例导引或附加偏置项^[1-2]、求解最优控制^[3-5]、Lyapunov 理论^[6]等方法实现. 攻击时间控制导引律能够实现多枚导弹同时到达目标点或按时间点定序到达, 这类导引律可通过比例导引附加偏置项^[7]、求解最优控制^[8-11]、采用动态逆设计^[12]等方法获得.

从系统的协调方式看, 实现多导弹时间协同(同时到达或按预定时刻定序到达)的方案有两种: 1) 事先指定攻击时间, 然后各导弹采用带有攻击时间控制

的导引律独立制导(可参考文献[8]); 2) 事先不指定攻击时间, 所有导弹依靠通信网络实现协同制导. 本质上, 方案1)是一种分散式的控制方式, 导弹间缺少通信与协商, 若某枚导弹攻击时间的控制失效, 就不能保证所有导弹的时间协同性. 对于方案2), 相关的研究见文献[12-17]: 文献[12]给出的领弹-被领弹策略是一种集中式控制方式, 即所有被领弹都必须与领弹存在通信. 文献[13]的方法要求所有导弹与指挥中心均存在双向连接, 且未考虑“上传-解算-广播”过程所消耗的时间. 文献[14-16]研究了局部通信条件下的多导弹时间协同导引问题, 但这种依靠一致性算法获得各导弹期望剩余时间的方法都面临一个共同的问题, 即各导弹期望剩余时间的收敛依赖于实际剩余时

收稿日期: 2013-01-09; 修回日期: 2013-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273058).

作者简介: 马国欣(1983-), 男, 博士生, 从事导航、制导与控制的研究; 张友安(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器精确制导、非线性控制等研究.

间(实际剩余时间作为一致性算法的初始值),而各导弹又通过控制作用使实际剩余时间向期望剩余时间收敛.换言之,期望剩余时间的收敛与实际剩余时间的收敛互为前提,系统的稳定性不能得到保证.尽管文献[16]保守地求解了一致性算法的收敛周期,但所得结论对某些情况不能适用,举一个简单的实例:当某一枚导弹的初始视线角速率或前置角接近于0时,其给出的一致性算法收敛速率的下限就接近于0,而收敛周期接近于无穷大,从而导致算法不能启动.为实现一般意义上的协同控制,避免出现类似的问题,必须摒弃期望剩余时间的概念,不采用“先确定期望值,后跟踪期望值”这种分步控制的方法,而是直接互调各导弹的剩余时间差以实现所有导弹的时间协同.文献[17]通过分布式导引直接实现了多导弹剩余时间的相互调整,但该方法对于网络通信拓扑条件的要求过于苛刻,需要通信网络全互连.此外,文献[12-17]均没有考虑攻击角度约束的问题.

在编队组网的复杂战场环境下,全互连的网络拓扑条件不能得到保证.本文研究的重点内容是以直接互调各导弹的剩余时间差为手段,考虑攻击角度约束的要求,实现局部通信且网络拓扑存在跳变条件下的多导弹时间协同导引.首先,将各导弹作为网络同构节点(在网络拓扑结构中地位相同),以导弹在某种基本导引律下的剩余时间附加预定偏置作为节点输出;然后,结合文献[18-19]给出的一般动态系统的协同控制方法,设计了局部通信条件下的多导弹分布式时间协同导引律,并给出了保证系统协同性的网络拓扑条件;最后,通过仿真实例,表明了在满足一定的网络拓扑条件下,编队组网的多枚导弹能够实现对目标的同时攻击以及定序攻击.

1 多导弹网络同构协同制导系统建模

考虑由 q 枚导弹构成的导弹编队,其中第 i 枚导弹的导引模型描述为

$$\begin{cases} \dot{r}_i = -v_i \cos \varphi_i, \\ r_i \dot{q}_i = v_i \sin \varphi_i, \\ q_i = \theta_i + \varphi_i, \\ \dot{\theta}_i = \frac{a_i}{v_i}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $i \in \{1, 2, \dots, q\}$, r_i 为弹目距离, q_i 为视线角, φ_i 、 θ_i 和 v_i 分别为导弹的前置角、航向角和速度大小.在多导弹协同制导体系中,各导弹的导引指令均由两部分构成

$$a_i = a_{i1} + a_{i2}, \quad (2)$$

其中: a_{i1} 为某种基本导引律,用以保证导弹命中目标,由导弹自身的导引信息形成反馈; a_{i2} 用以实现时间协同控制,由通信网络获得的其他导弹的输出信息以及导弹的自身导引信息形成反馈,即

$$\begin{cases} a_{i1} = f_{i1}(r_i, q_i, \theta_i, v_i), \\ a_{i2} = f_{i2}(s_{i1}(t)\varepsilon_1, \dots, s_{iq}(t)\varepsilon_q, (r_i, q_i, \theta_i, v_i)). \end{cases} \quad (3)$$

其中: ε_j 为第 j 枚导弹的网络输出, $j \in \{1, 2, \dots, q\}$; f_{i1} 和 f_{i2} 表示一般形式的函数; $s_{ij}(t)$ 为二元函数,反映通信网络的连接情况, $s_{ii} \equiv 1$; 在 t 时刻,当第 j 枚导弹至第 i 枚导弹存在通信连接时, $s_{ij}(t) = 1$, 否则 $s_{ij}(t) = 0$. 为了便于描述信息的传递情况,定义通信矩阵为

$$S(t) \triangleq \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12}(t) & \dots & s_{1q}(t) \\ s_{21}(t) & s_{22} & \dots & s_{2q}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{q1}(t) & s_{q2}(t) & \dots & s_{qq} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

时间协同导引问题的核心在于各导弹剩余时间(含预定偏置)的一致性,当所有导弹的剩余时间趋于一致时,期望 a_{i2} 趋于0,导引指令回归到仅 a_{i1} 作用下的基本导引方式.因此, ε_i 选取为第 i 枚导弹在 a_{i1} 作用下的剩余时间与预定偏置之差.不失一般性, ε_i 可以表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_i = t_{go,i} - c_i, \\ t_{go,i} = \frac{[1 + f_{i3}(q_i, \theta_i)]r_i}{v_i}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: $t_{go,i}$ 为第 i 枚导弹的剩余时间, c_i 为给定的常数, f_{i3} 为一般形式的函数.式(1)~(5)描述了由 q 枚导弹构成的多导弹协同制导系统.对于单个导弹而言,其本地控制目的(导引目标)为 $\lim_{t \rightarrow T_1} r_i = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, q\}$, T_1 为某个有限的时间;对于协同制导系统而言,其协同控制目的(协同导引目标)为 $\lim_{t \rightarrow T_2} (\varepsilon_i - \varepsilon_j) = 0, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, q\}$, T_2 为某个有限的时间, $T_2 \leq T_1$. 注意到, $c_i = c_j$ 意味着第 i 枚导弹与第 j 枚导弹同时到达, $c_i \neq c_j$ 意味着第 i 枚导弹与第 j 枚导弹按一定的时差依次到达.

2 分布式导引律设计

对于导弹独立制导时的攻击时间控制问题,设计者往往通过在传统比例导引律(或带角度约束的偏置比例导引律)基础上附加剩余时间误差反馈项来实现,或者说,最终设计的导引律具备某种基本导引律附加反馈项的类似形式.下面以文献[8-9]给出的导引律为例,将其应用到多导弹分布式时间协同导引律的设计中.

文献[8]给出的无角度约束的攻击时间控制导引律为

$$a_{i,ITCG} = Nv_i \dot{q}_i - K_1(\bar{t}_{go} - t_{go,i}). \quad (6)$$

其中: $N = 3$, $t_{go,i} = \frac{(1 + \varphi_i^2/10)r_i}{v_i}$ 为传统比例导引律的剩余时间估计, \bar{t}_{go} 为标称剩余时间, K_1 为剩余时间误差反馈项的系数,后两项的具体表达式参见文献[8].

文献 [9] 给出的有角度约束的攻击时间控制导引律为

$$a_{i,ITACG} = \int_0^t g_{IACG}(r_i, q_i, \theta_i, v_i, \theta_d, a_{i,ITACG})dt + \int_0^t K_2(\bar{t}_{go} - t_{go,i})dt. \quad (7)$$

其中: g_{IACG} 为以导弹法向加速度一阶导数为控制量的攻击角度控制导引律, K_2 为剩余时间误差反馈项的系数, \bar{t}_{go} 为标称剩余时间, $t_{go,i}$ 为仅在 g_{IACG} 作用下的剩余时间估计, 这 4 项的具体表达式详见文献 [9]; θ_d 为给定的常值, 代表期望的攻击角度.

对式 (5) 两边求导, 并结合式 (1) 和 (2), 整理得

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i = & \left(\frac{\partial f_{i3}}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f_{i3}}{\partial \theta_i} \frac{a_{i1}}{v_i} \right) \frac{r_i}{v_i} + \\ & [1 + f_{i3}(q_i, \theta_i)] \frac{\dot{r}_i}{v_i} + \\ & \frac{\partial f_{i3}}{\partial \theta_i} \frac{r_i}{v_i^2} a_{i2}, \end{aligned} \quad (8)$$

ε_i 为导弹仅在 a_{i1} 作用下的剩余时间 (含预定偏置), 因此当 $a_{i2} = 0$ 时, 有 $\dot{\varepsilon}_i = -1$, 式 (8) 可简化为

$$\dot{\varepsilon}_i = -1 + H_i a_{i2}, \quad (9)$$

其中 $H_i = \frac{\partial f_{i3}}{\partial \theta_i} \frac{r_i}{v_i^2}$.

由协同控制理论^[18-19]可知, 若将式 (9) 视为一般的动态系统 (符号无特殊物理意义), 选取

$$a_{i2} = H_i^{-1} \left(\sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}\varepsilon_j}{\sum_{j=1}^q s_{ij}} - \varepsilon_i \right) = H_i^{-1} \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}}{\sum_{j=1}^q s_{ij}} (\varepsilon_j - \varepsilon_i),$$

可实现协同控制目的. 对多导弹时间协同制导系统而言, 第 i 枚导弹的协同控制目的可以描述为

$$\varepsilon_i \rightarrow \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}\varepsilon_j}{\sum_{j=1}^q s_{ij}}.$$

对于独立制导的情况, 导弹采用式 (6) 或 (7) 表示的攻击时间控制导引律时, 能够实现导弹剩余时间对标称剩余时间的跟踪, 即选取 $a_{i2} = -K_1(\bar{t}_{go} - t_{go,i})$ 或 $a_{i2} = \int_0^t K_2(\bar{t}_{go} - t_{go,i})dt$ 时, 有 $t_{go,i} \rightarrow \bar{t}_{go}$. 因此,

对于协同制导的情况, 为实现 $\varepsilon_i \rightarrow \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}\varepsilon_j}{\sum_{j=1}^q s_{ij}}$, 无角

度约束的多导弹时间协同导引律设计为

$$a_i = N v_i \dot{q}_i - K_1 \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}}{\sum_{j=1}^q s_{ij}} (\varepsilon_j - \varepsilon_i). \quad (10)$$

有角度约束的多导弹时间协同导引律设计为

$$a_i = \int_0^t g_{IACG} dt + \int_0^t K_2 \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}}{\sum_{j=1}^q s_{ij}} (\varepsilon_j - \varepsilon_i) dt. \quad (11)$$

文献 [18-19] 指出, 对于一般的闭环协同系统

$$\dot{\varepsilon}_i = \sum_{j=1}^q \frac{s_{ij}}{\sum_{j=1}^q s_{ij}} (\varepsilon_j - \varepsilon_i),$$

$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, q\}$, 系统状态趋于一致 (即 $\varepsilon_i \rightarrow c_0$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, q\}$, c_0 为常值, 描述系统协同行为的最终状态) 的充要条件为: 当且仅当系统具备“一个”通信网络. 从网络拓扑结构看, 这里的“一个”等价于网络的任意两节点间具备连通性.

多导弹时间协同控制系统的特殊性在于, 对于固定的 r_i/v_i , 每个节点输出的 ε_i 都存在极小值. 式 (5) 中的 f_{i3} 满足 $\min_{q_i, \theta_i} \{f_{i3}(q_i, \theta_i)\} = 0$, 其物理意义为: 当导弹沿直线弹道向目标飞行时, 施加任何形式的法向控制, 导弹的剩余时间都不能再减小. 因此, 对于系统中的任意两节点 i 和 j , 若 i 与 j 之间仅存在一条通路, 比如信号由 i 向 j 传递, 当 $\varepsilon_i > \varepsilon_j$ 时, 通过协同控制作用可使 ε_j 相对增大, 从而保证 $\lim_{t \rightarrow T_2} (\varepsilon_i - \varepsilon_j) = 0$; 当 $\varepsilon_i < \varepsilon_j$ 时, 通过协同控制作用可使 ε_j 相对减小, 但是, 若 ε_j 已然达到极小值, 则 ε_j 不再受控, 此时节点 i 与 j 的协同性不能得到保证. 因此, 对于 $\varepsilon_i < \varepsilon_j$, 且 ε_j 不能再减小的情况, 需要根据 ε_j 的信息通过控制作用使 ε_i 相对增大, 即节点 i 与 j 之间需要存在双向通路. 综上分析, 通信网络强连通是实现多导弹时间协同导引的充分条件.

3 仿真实例

假设 4 枚导弹编队组网协同攻击位于坐标原点 (0, 0) 的目标, 导弹初始参数见表 1, 各导弹可用过载为 $5g$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 要求所有导弹同时击中目标, 对攻击角度没要求. 仿真步长取 0.01 s. 假定通信矩阵在下面 3 种拓扑结构中随机切换, 切换周期为 1 s.

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

表 1 导弹初始参数

	初始坐标/km	初始航向角/deg	速度/(m/s)
导弹 1	(-6, 6)	50	250
导弹 2	(-10, 0.5)	30	280
导弹 3	(-3, 10)	-20	300
导弹 4	(-8, -5)	-20	260

导弹采用传统的比例导引律时, 4 枚导弹到达目标的时间分别为 46.07 s、36.97 s、38.05 s、39.50 s, 其攻击时间最大相差 9.1 s, 此种导引方式不能实现期望的协同打击。

导弹采用文献 [16] 给出的协同末制导时间一致性策略。首先, 计算初始条件下的 γ_i , $i=1, 2, 3, 4$ (符号定义参见文献 [16]), 有 $\gamma_1 = 18.9822$, $\gamma_2 = 65.1392$, $\gamma_3 = 38.1786$, $\gamma_4 = 25.1184$; 然后, 取 $w=0.1$, 解得一致性算法的收敛周期为 $\Delta T = 190.1476$ s。文献 [16] 给出的分段迭代算法不能实施, 仿真结果等同于传统比例导引律的情况, 此种导引方式亦不能实现期望的协同打击。

导弹采用式 (10) 给出的协同导引律, 为了实现同时到达的要求, 取 $c_i = 0$, $i = 1, 2, 3, 4$ 。仿真结果如图 1 所示。

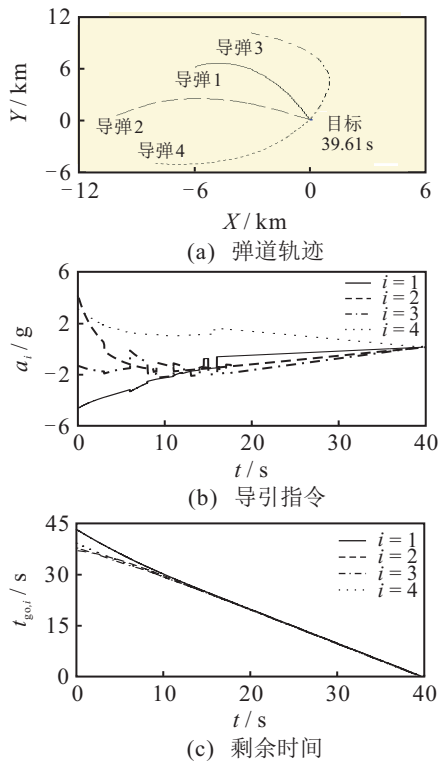


图 1 无角度约束时多导弹协同制导的仿真结果

从图 1(c) 可以看到, 在协同导引下, 各导弹的剩余时间由不同的初始值逐渐趋于一致, 从而使表 1 给出的 4 枚导弹最终在 39.61 s 时同时命中目标。由式 (10) 可知, 随着所有导弹的剩余时间趋于一致, 协同导引律将退化为各弹自身的比例导引。在导引后期, 导弹的弹道趋于平直, 法向过载趋于 0, 如图 1(b)、(c) 所示。仿真结果验证了在满足通信网络强连通的前提下, 第 2 节给出的分布式导引律 (10) 能够实现局部通信且网络拓扑结构存在随机跳变条件下的无角度控制要求的多导弹组网时间协同导引。

为取得更好的打击效果, 不仅对多导弹的协同到达时间有一定的要求, 而且希望导弹能够以特定的

攻击角度打击目标。为了验证带有角度约束的协同导引律 (11) 的有效性, 假定表 1 所示 4 枚导弹期望的终端攻击角度分别为 -60° 、 0° 、 -60° 、 0° , 要求按照导弹 4 至导弹 1 的顺序依次打击目标, 预定的打击时间间隔均为 0.5 s。

导弹采用无时间要求的攻击角度控制导引律^[9]时, 4 枚导弹到达目标的时间分别为 44.55 s、37.26 s、38.43 s、40.53 s, 其攻击时间最大相差 7.29 s, 其攻击顺序为导弹 2、导弹 3、导弹 4、导弹 1, 此种导引方式不能实现期望的协同打击。

导弹采用式 (11) 给出的协同导引律, 取 $c_1 = 0$, $c_2 = -0.5$, $c_3 = -1$, $c_4 = -1.5$, 其余仿真参数同上, 结果如图 2 所示。

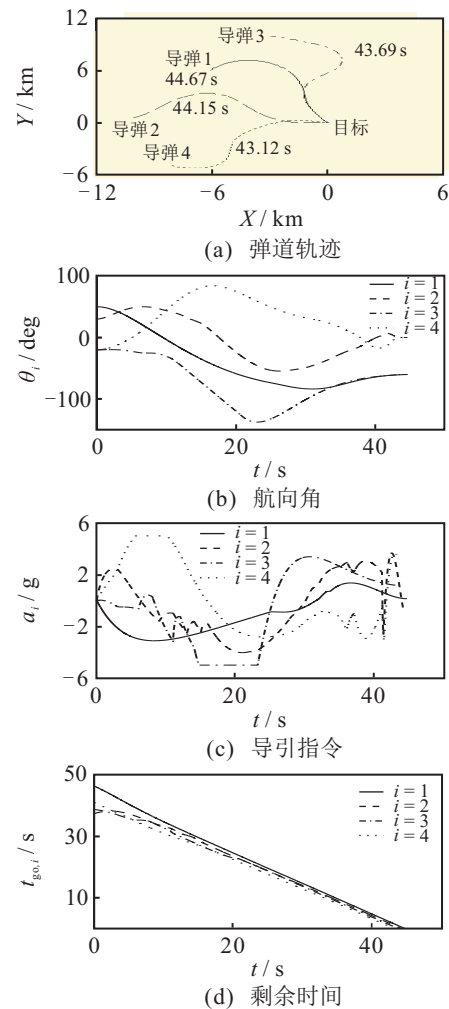


图 2 有角度约束时多导弹协同制导的仿真结果

图 2(a) 给出了所有导弹的弹道轨迹及到达目标的时间, 4 枚导弹到达目标的先后顺序依次为导弹 4、导弹 3、导弹 2、导弹 1, 符合协同打击的要求。时间间隔分别为 0.57 s、0.46 s、0.52 s, 与期望时间间隔 0.5 s 的最大误差为 0.07 s。在攻击时间满足要求的同时, 各导弹的航向角均收敛于期望的攻击角度, 如图 2(b) 所示。导弹 1~导弹 4 的终端航向角依次为 -60° 、 0.1° 、 -60.1° 、 0° , 与期望攻击角度的最大误差不超

过 0.1° 。从图2(d)可以看到,各导弹的剩余时间按照预定的时间偏置量逐渐趋于一致,体现了时间协同控制的有效性。

若导弹采用式(11)给出的协同导引律,取 $c_i = 0$, $i = 1, 2, 3, 4$,则可实现带有指定攻击角度约束的多导弹同时到达,该部分结果不再给出。

仿真结果表明,在满足通信网络强连通的前提下,第2节给出的分布式导引律(11)能够实现有角度控制要求的多导弹组网时间协同导引,通过设定各导弹协同行为的偏置常数,可以实现多导弹对目标的同时打击及定序打击。

4 结 论

针对组网条件下的多导弹时间协同导引问题,本文给出了基于协同控制理论设计的两种导引律,即无角度约束的时间协同分布式导引律及有角度约束的时间协同分布式导引律。两种导引律均由一种基本导引律与时间协同反馈控制项构成,并直接实现了局部通信条件下各导弹剩余时间的相互调整。与采用一致性算法获得各导弹期望导引时间的方法相比,这种直接互调各导弹剩余时间的方法避免了由于中间量的引入而出现的收敛耦合问题。仿真结果表明,在满足通信网络强连通的前提下,给出的两种导引律能够分别实现无攻击角度约束及有攻击角度约束时的多枚导弹协同打击。

参考文献(References)

- [1] Jeong S K, Cho S J, Kim E G. Angle constraint biased PNG[C]. Proc of the 5th Asian Control Conf. Melbourne, 2004, 3: 1849-1854.
- [2] Kim B S, Lee J G, Han H S. Biased PNG law for impact with angular constraint[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 277-288.
- [3] Ryoo C K, Cho H, Tahk M J. Optimal guidance laws with terminal impact angle constraint[J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(4): 724-732.
- [4] Ryoo C K, Cho H, Tahk M J. Closed-form solutions of optimal guidance with terminal impact angle constraint[C]. Proc of the 2003 IEEE Conf on Control Applications. Istanbul, 2003, 1: 504-509.
- [5] Ryoo C K, Cho H, Tahk M J. Time-to-go weighted optimal guidance with impact angle constraints[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(3): 483-492.
- [6] Sang D, Min B M, Tahk M J. Impact angle control guidance law using Lyapunov function and PSO method[C]. Proc of the Annual SICE Conf. Kagawa, 2007: 2253-2257.
- [7] Zhang Youan, Ma Guoxin. A biased PNG law with impact time constraint for anti-ship missiles[C]. 2012 Chinese Guidance, Navigation and Control Conf. Beijing, 2012: 874-878.
- [8] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.
- [9] Lee J I, Jeon I S, Tahk M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 301-310.
- [10] 陈志刚,孙明玮,马洪忠.基于误差反馈补偿的攻击无人机角度和时间控制[J].航空学报,2008,29(增):33-38. (Chen Z G, Sun M W, Ma H Z. UAV's impact angle and time control based on error feedback compensation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(S): 33-38.)
- [11] Shunsaku Arita, Seiya Ueno. Improvement of guidance law for simultaneous attack[C]. SICE Annual Conf 2011. Tokyo, 2011: 1807-1812.
- [12] 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 Y A, Ma G X, Wang X P. Time-cooperative guidance for multi-missiles: A leader-follower strategy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1109-1118.)
- [13] 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 S Y, Zhou R. Cooperative guidance for multi-missiles using cooperative variables[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1605-1611.)
- [14] 邹丽,周锐,赵世钰,等.多导弹编队齐射攻击分散化协同制导方法[J].航空学报,2011,32(2):281-290. (Zou L, Zhou R, Zhao S Y, et al. Decentralized cooperative guidance for multiple missile groups in salvo attack[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 281-290.)
- [15] Zhao Shiyu, Zhou Rui. Cooperative guidance for multi-missile salvo attack[J]. Chinese J of Aeronautics, 2008, 21(6): 533-539.
- [16] 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. (Peng C, Liu X, Wu S T, et al. Consensus problems in distributed cooperative terminal guidance time of multi-missiles[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1557-1561.)
- [17] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2010, 33(1): 275-280.
- [18] Zhihua Qu, Jing Wang, Pollak E, et al. Cooperative control of dynamical systems and its robustness analysis[C]. Proc of the 45th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 3614-3621.
- [19] Zhihua Qu, Jing Wang, Hull R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(4): 894-911. (责任编辑:齐 霁)