异构多导弹网络化分布式协同制导方法

邹 丽

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

丁全心

(洛阳电光设备研究所 火力控制技术国防科技重点实验室，洛阳 471009)

周 锐

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：基于相邻局部通信的领弹-被领弹异构网络结构，提出了一种多导弹分布式协同制导方法，设计了分散化的协同制导律.运用图论的描述方法，分析了导弹分布式局部通信拓扑与领弹-被领弹异构网络化分布式协同制导系统性能之间的关系.该分布式协同制导律仅需要相邻导弹之间传输各自的可测状态信息，具有可扩展性好、通信量少等特点.给出了4个被领弹和一个领弹的协同制导律设计仿真算例，结果验证了该制导方法的有效性.

关 键 词：导弹；协同制导；异构网络；协同攻击

中图分类号：TJ 765.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1432-04

Distributed cooperative guidance for multiple heterogeneous networked missiles

Zou Li

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Ding Quanxin

(Key Laboratory of National Defense on Fire Control Technology, Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Luoyang 471009, China)

Zhou Rui

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A distributed leader-follower heterogeneous multi-missiles cooperative guidance law was proposed based on local nearest-neighbor communication. The distributed local communication topology between the missiles was modeled using the graph-theoretic methods. The relations between the communication topology and the performance of cooperative guidance system for multiple heterogeneous networked missiles were investigated. Only the measurable states of missiles were required to be communicated between the nearest-neighbor missiles for the proposed distributed heterogeneous multi-missiles cooperative guidance law, which resulted in the characteristics of scalability and little communications. As an example, the distributed leader-follower missile cooperative guidance law for one leader and four followers was designed. The simulation results demonstrated the effectiveness of the proposed distributed cooperative guidance law.

Key words: missile; cooperative guidance; heterogeneous network; salvo attack

收稿日期：2009-10-21

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60975073)；航空科学基金资助项目(2010ZC51028)；博士点基金资助项目(20091102110006)

作者简介：邹 丽(1987—)，女，江西南昌人，硕士生，woaibama1987@163.com.

随着信息化和网络化技术的快速发展,多导弹协同攻击将是一种更符合现代信息化战争思想的作战方法.通过充分利用各导弹不同的性能特点及相互间的配合,不仅可以提高突防能力,还能完成单枚导弹不可能完成的任务,如实现战术隐身、增强电子对抗能力等[1].

由于网络中各导弹的作用及角色各不相同,具有领弹-被领弹结构,即所谓的异构型,可降低对被领弹弹载计算和探测设备的要求.

文献[1]讨论了一些战术和概念上的问题.文献[2]提出了一种攻击时间可控的导弹制导律,并将该制导律应用于反舰导弹的齐射攻击.文献[3—4]通过将导弹剩余飞行时间作为协调变量,分别提出了基于集中和分散协调策略的同构多导弹协同制导方法,具有通信量小和分布性好的特点.文献[5]运用非线性跟踪控制原理,提出了一种基于虚拟领弹且时间可控的多导弹协同制导方法.文献[6] 基于时标分离和动态逆控制方法,提出了一种基于领弹和被领弹策略的多导弹时间协同制导律.这些基于领弹或虚拟领弹的协同制导方法都有一个共同的特点:即所有被领弹与领弹之间必须进行通信,本质上是一种集中式结构,鲁棒性和可扩展性较差,也不利于导弹战术隐身与静默攻击.

本文基于非线性受控一致性原理,提出一种基于相邻局部通信的领弹-被领弹异构多导弹网络化分布式协同制导方法,具有通信量小,动态可重构,可扩展性好等特点.

1　领弹-被领弹协同制导模型

具有局部通信的领弹-被领弹异构多导弹网络化分布式协同制导原理如图 1 所示,导弹 M_0,$M_i(i=1,2,3,4)$之间均采用视距内相邻通信.领弹 M_0 沿给定导引律飞行,不受被领弹 $M_i(i=1,2,3,4)$的约束;被领弹则在给定导引律基础上基于通信拓扑所确定的连接关系叠加分布式协同控制分量以实现协同,但只有与领弹有通信连接的被领弹才受领弹的直接约束.

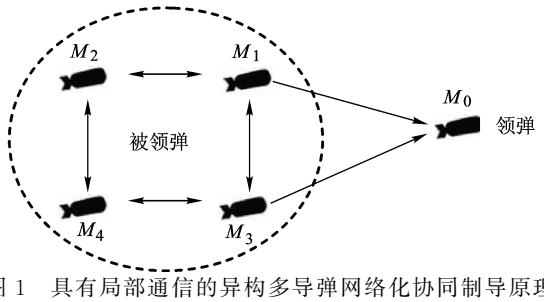
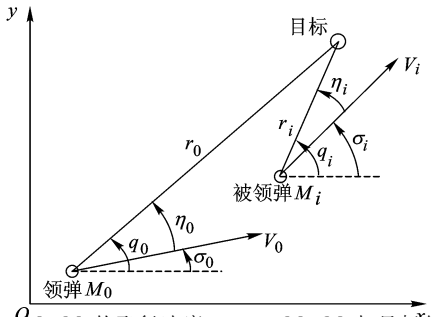


图 1　具有局部通信的异构多导弹网络化协同制导原理

M_0 及 M_i 与目标的相对运动关系如图 2 所示[6].设 M_0 按比例导引飞行,不受 M_i 的约束,速度 V 保持不变.



V_0,V_i—M_0,M_i 的飞行速度;r_0,r_i—M_0,M_i 与目标的距离;q_0,q_i—M_0,M_i 与目标的视线角;σ_0,σ_i—M_0,M_i 的速度角;η_0,η_i—M_0,M_i 的前置角.

图 2　领弹-被领弹与目标的相对运动关系

假设目标静止不动,得到 M_0 相对目标的导引关系为

$$\dot{r}_0=-V\cos\eta_0 \qquad r_0\dot{q}_0=V\sin\eta_0$$

$$q_0=\sigma_0+\eta_0 \qquad \dot{\sigma}_0=\frac{a_0}{V}$$

其中,a_0 为 M_0 法向加速度指令,采用经典比例导引:

$$a_0=NV_0\dot{q}_0$$

其中,N 为比例导引系数.由以上各式经简单变换可得 M_0 在比例导引下的闭环制导系统模型:

$$\left.\begin{aligned}\dot{r}_0&=-V\cos\eta_0\\ \dot{\eta}_0&=(1-N)V\frac{\sin\eta_0}{r_0}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

设 M_i 采用"比例导引+分布协同导引"的制导策略.据此可以得到 M_i 的协同制导系统模型:

$$\left.\begin{aligned}\dot{r}_i&=-V\cos\eta_i+a_{i1}\\ \dot{\eta}_i&=(1-N)V\frac{\sin\eta_i}{r_i}+a_{i2}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,a_{i1} 和 a_{i2} 分别为 M_i 在比例导引基础上叠加的分布式协同控制分量,对 M_i 的速度和方位角进行在线调整,以实现协同任务.

对于多弹齐射协同攻击而言,若在攻击目标后期能保证 $r_i=r_0$,$\eta_i=\eta_0$ 或 $r_i=r_0$,$\eta_i=-\eta_0$,则领弹和所有被领弹将同时到达目标[6].因此,分布式协同制导律的设计就变为如何设计分布式协同控制量 a_{i1} 和 a_{i2} 满足这一要求.

2　异构多导弹网络化分布协同制导

2.1　异构网络的通信拓扑描述

考虑图 1 所示的基于分布式局部通信的异构多导弹网络的协同控制结构,整个网络的通信拓

扑结构可分成两个部分.

2.1.1 被领弹与被领弹之间的通信拓扑

被领弹 M_j 与被领弹 M_i 之间的通信拓扑 G_f 可用它们之间的通信连接系数 α_{ji} 和通信加权值 μ_{ji} 来描述,其中

$$\alpha_{ji}=\begin{cases}1 & \text{若 } M_i \text{ 与 } M_j \text{ 有通信连接}\\ 0 & \text{若 } M_i \text{ 与 } M_j \text{ 无通信连接}\end{cases}$$

2.1.2 领弹与被领弹之间的通信拓扑

领弹 M_0 与被领弹 M_j 之间的通信拓扑 G_0 可用它们之间的通信连接系数 β_{0i} 和通信加权值 γ_{0i} 来描述,其意义类同 α_{ji} 和 μ_{ji}.

导弹之间的通信连接关系可以用图论中的加权拉普拉斯矩阵来描述[7]. M_j 与 M_i 之间通信拓扑 G_f 的加权拉普拉斯矩阵为 $\boldsymbol{L}_f=(l_{ij})_{n\times n}$,其元素为

$$l_{ij}=\begin{cases}\sum\limits_{j\in\Omega_i}\mu_{ij}\alpha_{ij} & i=j,i=1,2,\cdots,n\\ \mu_{ij}\alpha_{ij} & i\neq j,j\in\Omega_i,i=1,2,\cdots,n\end{cases}$$

其中,Ω_i 为与 M_i 相邻的其它被领弹集合.

M_0 与 M_i 之间的通信拓扑 G_0 的加权拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}_0$ 为块对角阵,可表示为

$$\boldsymbol{L}_0=\mathrm{diag}[\gamma_{01}\beta_{01},\gamma_{02}\beta_{02},\cdots,\gamma_{0n}\beta_{0n}]_{n\times n}$$

2.2 异构网络化分布式协同制导方法

由式(1)和式(2),定义状态向量 $\boldsymbol{x}=[r\quad\eta]^{\mathrm{T}}$,则 $f(\boldsymbol{x},t)$ 表示的比例导引下导弹闭环制导系统模型如下:

$$f(\boldsymbol{x},t)=\begin{bmatrix}-V\cos\eta\\ (1-N)V\dfrac{\sin\eta}{r}\end{bmatrix}\tag{3}$$

其中,r 为导弹与目标的距离;η 为导弹前置角.

定义 M_i 的分布式协同控制分量为

$$\boldsymbol{u}_i=[a_{i1}\quad a_{i2}]^{\mathrm{T}}\quad i=1,2,\cdots,n$$

于是,式(1)和式(2)所表示异构领弹-被领弹闭环制导系统模型可以表示成下述一般形式:

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_0&=f(\boldsymbol{x}_0,t)\\ \dot{\boldsymbol{x}}_i&=f(\boldsymbol{x}_i,t)+\boldsymbol{u}_i\quad i=1,2,\cdots,n\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式(4)意味着 M_0 沿给定导引律飞行,飞行状态不受 M_i 状态的约束;而 M_i 则在给定导引律基础上叠加了 $\boldsymbol{u}_i$,以实现协同任务.

基于非线性系统的一致性原理[8],选择 M_i 的分布式协同制导分量为

$$\boldsymbol{u}_i=\sum_{j\in\Omega_i}\mu_{ji}\alpha_{ji}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i)+\gamma_{0i}\beta_{0i}(\boldsymbol{x}_0-\boldsymbol{x}_i)\tag{5}$$

$\boldsymbol{u}_i$ 主要作用是实现 M_i 之间分布式协同,具有相邻通信和分布式计算特点.

由于 M_0 按比例导引飞行,且不受 M_i 约束,其比例导引下的闭环制导系统模型如式(1).

由此可见,M_i 的状态变化除了与 M_0 相同制导律引起的状态 $f(\cdot)$ 以外,还与 $M_j(j\in\Omega_i)$ 及 M_0 的状态有关,而这又依赖于 M_j 与 M_i 以及 M_0 与 M_i 之间的通信拓扑关系 G_f 和 G_0.

当状态模型 $f(\cdot)$ 以及通信拓扑 G_f 和 G_0 的加权拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}_f$ 和 $\boldsymbol{L}_0$ 满足关系[8]:

$$\lambda_{\min}(\boldsymbol{L}_f+\boldsymbol{L}_0)>\max_{i=1}^{n}\lambda_{\max}\left(\frac{\partial f}{\partial\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}_i,t)\right)\tag{6}$$

则所有 M_i 状态收敛于 M_0 状态,实现 M_0 与 M_i 之间协同,即

$$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_i(t)=\boldsymbol{x}_0(t)\quad i=1,2,\cdots,n$$

其中,$\lambda(\cdot)$ 为矩阵特征值. 式(6)是异构多导弹网络化分布式协同制导系统收敛的充分条件,也反映了可实现非线性一致性协调所要求的通信拓扑及系统模型.

3 多弹协同制导律设计实例与分析

考虑5枚导弹协同攻击目标,要求同时到达目标点. 目标位置在坐标原点,导弹初始位置 O_M 和初始前置角 η 如表1所示,导弹通信拓扑如图1所示. M_0 与 M_i 的初始速度 $V=300$ m/s,$N=3$.

表1 导弹初始参数及仿真结果

导弹	O_M/km	η/(°)	t_p/s	t_c/s
M_0	(−6.894,−5.785)	−30	30.84	30.84
M_1	(−3.294,−8.972)	−25	32.42	30.84
M_2	(9.397,−3.420)	20	33.75	30.84
M_3	(3.329,−8.693)	−35	32.23	30.84
M_4	(8.426,−7.071)	45	39.05	30.84

该分布式拓扑通信结构中,被领弹中只有 M_1,M_3 与 M_0 进行通信,M_1,M_2,M_3,M_4 之间是相邻局部双向通信.

选择合适的通信加权系数满足基于式(6)的协同收敛条件,即可实现这5个导弹的协同制导.

由表1,非协同情况3枚导弹的比例导引时间 t_p 各不相同,最大差距达到8 s多;而协同情况下3枚导弹的导引时间 t_c 都为30.84 s,且与 t_p 相同. 由图3和图4对比可知,比例导引与协同导引作用下被领弹的飞行轨迹均有较大差异,而领弹的飞行轨迹则没有变化. 事实上,从图5和图6可知,M_i 的状态在飞行的前15 s左右即收敛 M_0 的状态,且收敛速度很快. 这主要是因为 M_i 从速度大小和方位上同时进行协同引导,以尽快趋近 M_0 的状态. 图7为各被领弹速度变化规律,图8为各被领弹协同制导命令.

仿真结果表明:基于分布式相邻局部通信,可以实现领弹-被领弹异构多导弹的网络化分布式

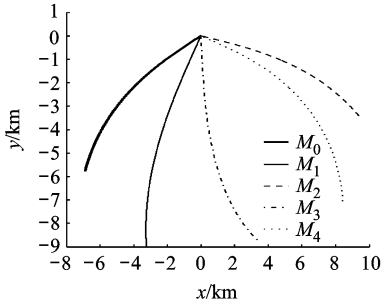


图 3　纯比例导引各导弹飞行轨迹

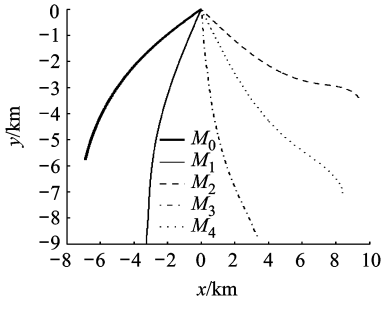


图 4　协同导引下各导弹飞行轨迹

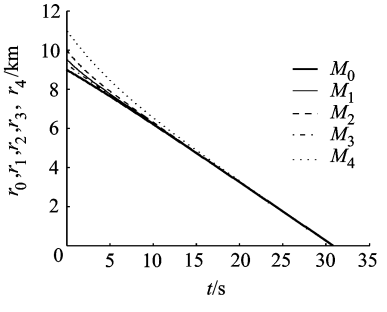


图 5　导弹与目标相对距离

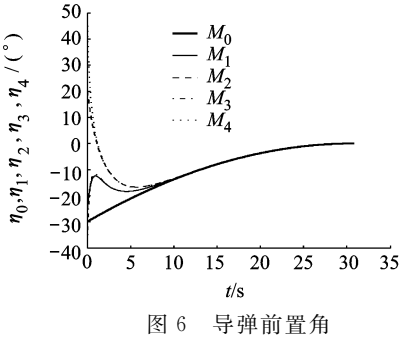


图 6　导弹前置角

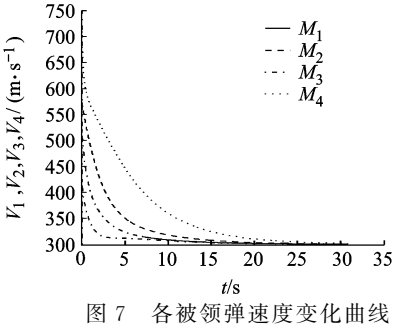


图 7　各被领弹速度变化曲线

协同制导.

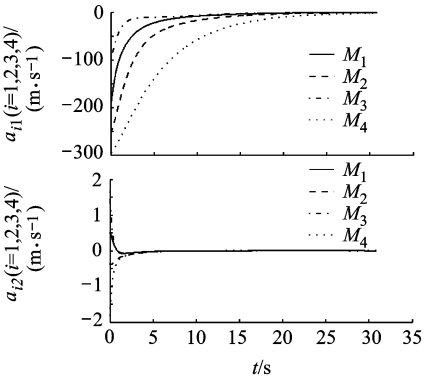


图 8　被领弹协同制导指令

4　结　论

领弹-被领弹协同能够提高导弹攻击突防概率,同时降低对被领弹弹载计算和探测设备的要求,从而降低成本. 由于该协同制导律具有局部通信和分布式计算等特点,使得制导律形式简单、实时性较好,且仅需相邻导弹之间传输各自的可测状态信息,通信量少,便于工程实现.

参考文献 (References)

[1] 张克,刘永才,关世义. 体系作战条件下飞航导弹突防与协同攻击问题研究[J]. 战术导弹技术,2005(2):1－7
Zhang Ke, Liu Yongcai, Guan Shiyi. An investigation into the issues of penetration and cooperative engagement for aerodynamic missile under the condition of systems countermeasures[J]. Tactical Missile Technology, 2005(2): 1－7 (in Chinese)

[2] 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

[3] 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 (in Chinese)

[4] Zhao Shiyu, Zhou Rui. Cooperative guidance for multimissile salvo attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 533－539

[5] Zhao Shiyu, Zhou Rui, Wei Chen. Design of time-constrained guidance laws via virtual leader approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(1): 103－108

[6] 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 Youan, 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 (in Chinese)

[7] Godsil C, Royle G. Algebraic graph theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2001

[8] Wang Wei, Jean-Jacques E S. A theoretical study of different leader roles network[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 51(7): 1156－1161

(编　辑:刘登敏)