攻击机动目标的多导弹分布式协同制导律

孙雪娇 周 锐 吴 江

(北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

陈哨东

(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)

摘 要: 在分布式通信和增广比例导引的基础上,基于网络同步原理设计了一种多导弹拦截机动目标的分布式协同制导律.该分布式协同制导律由导弹本地导引律和分布式协调策略两部分组成:本地导引律由增广比例导引得到;基于网络同步原理设计了导弹之间的分布式协调策略,实现多弹对机动目标的同时协同攻击.该分布式协同制导律只需要视距内相邻导弹之间传输状态信息,具有通信量小、可扩展性好等特点.仿真结果表明多弹网络系统采用该制导律能够有效地协同攻击机动目标.

关 键 词: 机动目标; 增广比例导引; 协同制导; 分布式通信

中图分类号: TJ 765.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1403-05

Distributed cooperative guidance law for multiple missiles attacking maneuver target

Sun Xuejiao Zhou Rui Wu Jiang

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Chen Shaodong

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

Abstract: On the basis of distributed communication and augmented proportional guidance, a kind of distributed collaborative guidance law was designed for maneuver target intercepting based on the network synchronization principle. This guidance law was based on double layer hierarchical cooperative structure, which was composed of local guidance law and distributed coordination strategy. The local guidance law was derived from augmented proportional navigation. Based on the network synchronization principle, distributed coordination strategy which realizes coordinated attack of maneuvering targets at the same time was synthesized. Only the states of missiles were required to be communicated between the nearest-neighbor missiles within-visual-range for the distributed multiple missiles cooperative guidance law, which resulted in the characteristics of scalability and communications. The simulation results demonstrate that this distributed cooperative guidance used by multi-missiles network system can realize coordinated attack of maneuvering target effectively.

Key words: maneuver target; augmented proportional navigation; cooperative guidance; distributed communication

收稿日期: 2012-12-25; **网络出版时间**: 2013-10-24 14:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131024.1447.004.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273349, 611751091, 61333004, 61203223); 航空科学基金资助项目(2011ZC13001, 2013ZA18001)

作者简介: 孙雪娇(1990-),女,山西朔州人,硕士生,sunxuejiaomars@126.com.

采用多枚导弹协同攻击能有效提高对机动目标的拦截概率. 多枚导弹之间通过数据链实现信息共享进而实现协同攻击,可极大地增强导弹的攻击能力,提高对敌方导弹或飞机等机动目标的拦截概率. 实现多导弹协同攻击的前提是设计合适的协同制导律,尤其是对于机动运动目标,对协同制导律的性能提出了更高要求.

文献[1]针对多枚导弹拦截一个机动目标问题,给出了一种协同制导律. 在多枚导弹综合代价函数的基础上推导得到考虑末端相对攻击角度约束的最优协同制导律. 该方法能够较好地完成多枚导弹协同攻击机动目标的任务,但是基于综合代价函数设计的协同制导律在应用时受到的约束会比较多,例如在进行攻击之前需要根据参与攻击的导弹数量等信息进行制导律的设计,并将这些制导律写入导弹中,因此改变制导律较困难,耗时较多. 在复杂快变的战场环境下,需要一种相对灵活的制导律.

基于协调变量的协同方法是近年来研究采用较多的方法[2-4]. 定义协调变量,由协调算法计算出协调函数的值. 协调算法包含两种:①集中式的协调算法;②分布式的协调算法. 集中式协调算法中存在集中协调单元,由集中协调单元给定协调变量的指令值,各个单元通过协调函数实现协调. 分布式协调算法不存在集中的协调单元,通过各协调单元之间的交互实现协调. 最终协调变量达到的值取决于协调算法. 文献[5]中提出了一种攻击时间可控的制导律(ITCG, Impact-Time-Control Guidance),该制导律由两部分组成:①用于目标的攻击,最后证明该部分等价于 N 取 3 时的比例导引;②用于对给定的制导时间的跟踪. 文献[6]在 ITCG 基础上设计了将剩余时间作为协调变量终端时刻可控的协同制导律. 但目前文献中还没有见到针对运动或机动目标的剩余时间可控制导律.

网络同步原理在无人机协同问题中应用广泛,在导弹协同攻击问题上已经出现了相关的应用文献. 文献[7]针对固定目标采用网络同步原理和“领弹-被领弹”通信模式设计了异构网络化分布式协同制导律. 结果表明:网络化分布式协同制导律能有效地解决多弹协同攻击问题,但该文同样没有考虑目标机动运动情况.

本文针对机动目标情况,提出一种机动目标的网络化分布式协同制导律设计方法. 该制导律由两部分组成:①单个导弹攻击机动目标的本地制导律,采用的是增广比例导引;②协同部分,采用网络同步原理设导弹之间的分布式协调策略.

1 运动学模型

为了简化导弹和目标的运动,假设如下:

1)导弹和目标为在俯仰平面的几何质点;

2)与制导回路的特性相比,自动驾驶仪和传感器的动力学特性可以忽略;

3)导弹的攻角很小;

4)在描述单个制导律时假设导弹和目标的速度大小为常值.

基于上述假设,第 i 个导弹与目标的相对运动方程可以表示为

$$\dot{\gamma}_{\mathrm{t}} = A_{\mathrm{t}}/V_{\mathrm{t}} \tag{1}$$

$$\dot{\gamma}_{\mathrm{m}i} = A_{\mathrm{m}i}/V_{\mathrm{m}i} \tag{2}$$

$$\dot{r}_i = (\rho_i\cos\theta_{\mathrm{t}i} - \cos\theta_{\mathrm{m}i})V_{\mathrm{m}i} \tag{3}$$

$$r_i\dot{\sigma}_i = (\rho_i\sin\theta_{\mathrm{t}i} - \sin\theta_{\mathrm{m}i})V_{\mathrm{m}i} \tag{4}$$

其中,下标 i 表示第 i 枚导弹;γ_{t},$\gamma_{\mathrm{m}i}$ 分别为目标和导弹的弹道倾角;V_{t},$V_{\mathrm{m}i}$ 分别为目标和导弹的速度;A_{t},$A_{\mathrm{m}i}$ 分别为目标和导弹的加速度;r_i 为导弹与目标的距离;σ_i 为视线角;$\theta_{\mathrm{t}i}$,$\theta_{\mathrm{m}i}$ 和 ρ_i 定义为

$$\left.\begin{aligned}\theta_{\mathrm{t}i} &= \gamma_{\mathrm{t}i} - \sigma_i\\ \theta_{\mathrm{m}i} &= \gamma_{\mathrm{m}i} - \sigma_i\\ \rho_i &= V_{\mathrm{t}}/V_{\mathrm{m}i}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

图 1 给出了多枚导弹协同攻击的示意图. M_i 为第 i 个导弹;T 为所攻击目标.

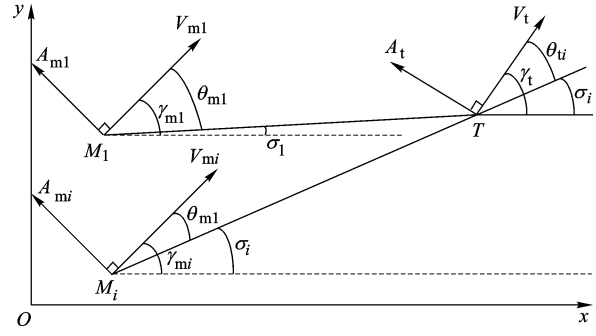


图 1 多弹协同攻击示意图

2 增广比例导引制导律

针对机动目标,文献[8]提出了一种增广比例导引制导律,在该制导律下导弹的法向加速度 $A_{\mathrm{m}ci}$ 表示为

$$A_{\mathrm{m}ci} = (1 + N_i/\cos\theta_{\mathrm{m}i})V_{\mathrm{m}i}\dot{\sigma}_i + \hat{A}_{\mathrm{t}}/\cos\theta_{\mathrm{m}i}$$

其中,N_i 为导引系数;$\hat{A}_{\mathrm{t}}$ 为目标法向加速度 A_{t} 在垂直于视线方向分量的估计值,在本文中认为目标的法向加速度已知且为常值,因此 $\hat{A}_{\mathrm{t}}$ 的表达式为

$$\hat{A}_{\mathrm{t}} = A_{\mathrm{t}}\cos\theta_{ti} \tag{6}$$

增广比例导引制导律在打击机动目标时相对比例导引具有需要的导引系数小的优势,在制导性能上也优于比例导引制导律,适用面更广[8]. N_i 的选择需要满足以下不等式:

$$N_i > \rho_i + \alpha r_i/(\hat{\beta}_i \mid V_{mi} \mid^2)$$

其中,α 为目标加速度的最大值;$\hat{\beta}_i$ 为$(0,1-\rho_i)$区间内的一个常数.

N_i 满足上述不等式,导弹能在合适大小的时间下击中目标[8]. 在后面的设计中各个导弹的本地制导律采用该增广比例导引制导律,导引系数 N_i 均取 3.

在取增广比例导引情况下,各个导弹与目标的运动方程可表示为

$$\dot{r}_i = (\rho_i\cos\theta_{ti} - \cos\theta_{mi})V_{mi} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{mi} &= \dot{\gamma}_{mi} - \dot{\sigma}_i = A_{mci}/V_{mi} - \dot{\sigma}_i = \\ &[(1 + N_i/\cos\theta_{mi})V_{mi}\dot{\sigma}_i + \\ &A_{ti}\cos\theta_{ti}/\cos\theta_{mi}]/V_{mi} - \dot{\sigma}_i = \\ &(N_i/\cos\theta_{mi})(\rho_i\sin\theta_{ti} - \sin\theta_{mi})V_{mi}/r_i + \\ &A_{ti}\cos\theta_{ti}/(V_{mi}\cos\theta_{mi})\end{aligned} \tag{8}$$

假定目标加速度为常值,则上述方程可以看出方程右端还存在变量 θ_{ti},由于

$$\begin{aligned}\theta_{ti} &= \gamma_{ti} - (\gamma_{mi} - \theta_{mi}) = \frac{A_{\mathrm{t}}}{V_{\mathrm{t}}}t + \theta_{mi} + \\ &\int[(1 + N_i/\cos\theta_{mi})\dot{\sigma}_i + A_{\mathrm{t}}\cos\theta_{ti}/V_{mi}\cos\theta_{mi}]\mathrm{d}t\end{aligned} \tag{9}$$

其中,t 为时间. 因此,θ_{ti}能表示为 $\theta_{ti}=g(r_i,\theta_{mi},t)$,即 θ_{ti}是该3个变量的函数. 取状态变量为 $\boldsymbol{x}_i=[r_i \quad \theta_{mi}]^{\mathrm{T}}$,式(8)可以表示为如下非线性方程式:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = f_i(\boldsymbol{x}_i,t) \tag{10}$$

在下面的协同制导律设计时将会用到该非线性方程的雅克比矩阵,涉及到$\partial\theta_{ti}/\partial r_i$ 及$\partial\theta_{ti}/\partial\theta_{mi}$的计算,为了计算方便,对方程(9)进行简化,定义

$$c_{i1} = \cos\theta_{mi} \qquad c_{i2} = \cos\theta_{ti}$$

则可以解出

$$\theta_{ti} = \frac{A_{\mathrm{t}}}{V_{\mathrm{t}}}t + \theta_{mi} + (1 + N_i/c_{i1})\left(\frac{A_{\mathrm{t}}}{V_{\mathrm{t}}}t - \theta_{ti}\right) + \frac{A_{\mathrm{t}}c_{i2}}{V_{mi}c_{i1}}t$$

$$(N_i/c_{i1} + 2)\theta_{ti} = (N_i/c_{i1} + 2)A_{\mathrm{t}}t/V_{\mathrm{t}} + \frac{A_{\mathrm{t}}c_{i2}}{V_{mi}c_{i1}}t + \theta_{mi}$$

$$\theta_{ti} = \left[\frac{A_{\mathrm{t}}}{V_{\mathrm{t}}} + \frac{A_{\mathrm{t}}c_{i2}}{V_{mi}c_{i1}(N_i/c_{i1} + 2)}\right]t + \frac{\theta_{mi}}{(N_i/c_{i1} + 2)}$$

3　网络化分布式协调策略

3.1　图论基础

为后续的分析讨论方便,对多弹攻击的网络通信拓扑结构进行分析,给出图论的基本概念[9]. 定义有向图 $G=(V,E,\boldsymbol{A})$,其中有限非空集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$是图 G 的节点集,节点的下标集记为 $I=\{1,2,\cdots,n\}$,节点可以用 $v_i\in V$ 或其下标 $i\in I$ 来表示,$E\subseteq V\times V$ 是图 G 的边集,边记为$e_{ij}=(v_i,v_j)$,$\boldsymbol{A}=[a_{ij}]\in\mathbf{R}^{n\times n}$是图 G 的邻接矩阵,定义 $\boldsymbol{A}$ 中的元素 $a_{ij}\geqslant 0 i,j\in I$.

定义加权 Laplace 矩阵 $\boldsymbol{L}_\kappa=[l_{ij}]\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 如下[9]:

$$\begin{cases} l_{ij} = -\mu_{ij}a_{ij} & i\neq j \\ l_{ii} = \sum\limits_{j=1,j\neq i}^{n}\mu_{ij}a_{ij} \end{cases}$$

其中,μ_{ij}为节点 j 流向节点 i 信息流的加权值.

3.2　网络化分布式协调策略

引理 1[10]　针对以下系统:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = f(\boldsymbol{x}_i,t) + \sum_{j\in\mathcal{N}_i}K_{ji}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i) \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{11}$$

其中,$\mathcal{N}_i$为所有与节点 i 存在信息传递的节点集合,节点之间的耦合是正定的,$K_{ji}=K_{ij}>0$ 为常数. 该系统中所有节点能实现同步的条件为

$$\lambda_{\min}(\boldsymbol{L}_\kappa) > \max_{i=1}^{n}\lambda_{\max}(\boldsymbol{J}_i) \tag{12}$$

其中,$\boldsymbol{L}_\kappa$ 为通信拓扑 G 的加权 Laplace 矩阵;$\lambda_{\max}(\cdot)$,$\lambda_{\min}(\cdot)$分别为矩阵最大、最小特征值;$\boldsymbol{J}_i=\dfrac{\partial f(\boldsymbol{x}_i,t)}{\partial\boldsymbol{x}_i}$为$f(\boldsymbol{x}_i,t)$的雅克比矩阵中的元素.

上述引理给出了多导弹网络化分布式协同制导系统收敛的充分条件,也反映了何种通信拓扑及系统模型可以实现非线性的一致性协调.

针对式(7)和式(8)描述的系统,设计多弹协同制导律为

$$\begin{aligned}\dot{r}_i &= (\rho_i\cos\theta_{ti} - \cos\theta_{mi})V_{mi} + \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i) \\ \dot{\theta}_{mi} &= (N_i/\cos\theta_{mi})(\rho_i\sin\theta_{ti} - \sin\theta_{mi})V_{mi}/r_i + \\ &A_{\mathrm{t}}\cos\theta_{ti}/(V_{mi}\cos\theta_{mi}) + \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\eta_{ij}a_{ij}(\theta_{mj} - \theta_{mi})\end{aligned} \tag{13}$$

定义

$$\boldsymbol{\mu}_{ji} = \begin{bmatrix}\zeta_{ij} & 0\\ 0 & \eta_{ij}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{K}_{ji} = \boldsymbol{\mu}_{ji}a_{ij}$$

其中,ζ_{ij},η_{ij}均为正实数,且满足 $\boldsymbol{\mu}_{ji}$正定. $\boldsymbol{K}_{ji}$反映

了系统变量之间的耦合程度和通信链路的权值大小. 式(13)可以表示为式(11)的形式. 需要指出的是,上述在进行协同制导律设计时假设切向速度受控[7].

3.3 分布式协调策略的实现

在协同制导过程中,各导弹制导律是以增广比例导引为基础,同时叠加分布式协同控制分量以实现多弹协同制导. 协同控制将同时改变导弹的飞行速度和法向过载. 因此,与纯比例导引情况不同的是:协同导引情况下各导弹为了实现分布式协同攻击,不仅需要改变飞行速度的方向,同时还将改变飞行速度的大小.

由于导弹控制量一般为沿速度切向和法向的加速度,因此将分布式协同控制律沿导弹速度法向和切向分解,首先由视线方向速度获得导弹的实际速度,进而获得导弹切向加速度,然后由视线方向改变的方程获得导弹的法向加速度分量,得到可实现的分布协同制导律.

由视线方向的速度:

$$\dot{r}_i = (V_t\cos\theta_{ti} - V_{mi}\cos\theta_{mi}) + \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i) = V_t\cos\theta_{ti} - V_{mip}\cos\theta_{mi} \tag{14}$$

其中,V_{mip}为各导弹的当前实际速度大小,由式(14)得到如下形式:

$$V_{mip} = \frac{V_{mi}\cos\theta_{mi} - \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}} = V_{mi} - \frac{\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}}$$

因此,导弹的切向加速度为

$$a_i^{\parallel} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}}\right) = -\frac{\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(\dot{r}_j - \dot{r}_i)}{\cos\theta_{mi}} - \frac{\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\zeta_{ij}a_{ij}(r_j - r_i)}{\cos^2\theta_{mi}}(\dot{\theta}_{mi}\sin\theta_{mi}) \tag{15}$$

导弹的法向加速度为

$$a_i^{\perp} = V_{mip}\dot{\gamma}_{mi} = V_{mip}(\dot{\theta}_{mi} + \dot{\sigma}_i) = V_{mip}\left[(N_i/\cos\theta_{mi} + 1)(V_t\sin\theta_{ti} - V_{mi}\sin\theta_{mi})/r_i + A_t\cos\theta_{ti}/(V_{mi}\cos\theta_{mi}) + \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\eta_{ij}a_{ij}(\theta_{mj} - \theta_{mi})\right] \tag{16}$$

4 仿真结果与分析

考虑3枚导弹对机动目标的协同攻击问题,要求3枚导弹同时击中目标. 目标的初始位置在(3 000,0)(单位:m,以下同),以速度200 m/s和法向加速度10 m/s^{2}机动飞行,3枚导弹分别从不同的位置出发,初始速度均对准初始视线方向,初始速度为400 m/s. 考虑两种情况的仿真.

1) 导弹之间无协同.

3枚导弹之间无信息交互、无协同,各导弹在增广比例导引下独立飞行,结果以不同的导引时间实现了对目标的攻击. 无协同情况下各导弹飞行时间和轨迹分别如表1和图2所示.

表1 导弹初始参数及仿真结果

导弹	初始位置/m	增广比例导引时间/s	协同制导时间/s
M_1	(0,0)	14.36	14.46
M_2	(-100,800)	13.48	14.46
M_3	(200,-800)	14.77	14.46

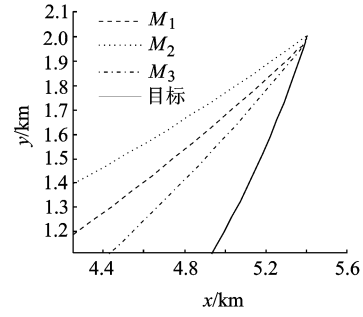


图2 无协同情况下多弹飞行轨迹(局部放大)

2) 导弹之间有协同.

导弹通信拓扑如图3所示,即3枚导弹互相之间均能互相传递信息. 权值选取满足引理1给出的条件:

$$\boldsymbol{\mu}_{ij} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}$$

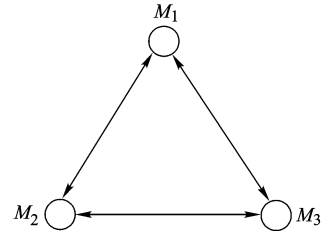
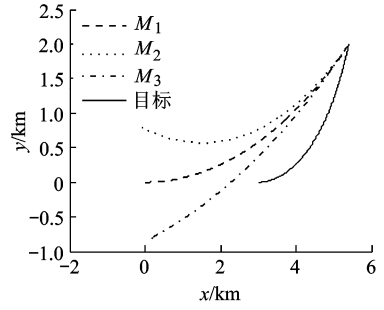


图3 导弹通信拓扑

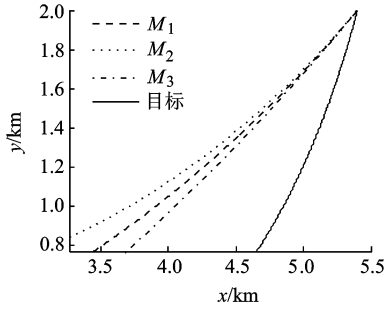
3枚导弹之间的通信加权矩阵均为采用网络化分布式协同制导律,3枚导弹以相同的制导时间完成了对目标的攻击,进而实现了齐射协同攻击. 协同情况下各导弹飞行时间和轨迹分别如表1、图4和图5所示,导弹之间实现了快速协同.

比较图2和图4结果可知,导弹之间进行网络化协同以后可以实现多枚导弹同时攻击目标. 并由图5可知,3枚导弹与目标视线距离快速收

敛到同一值,实现了对机动目标快速协同攻击.



a　原图



b　局部放大图

图 4　分布式协同下的多弹飞行轨迹

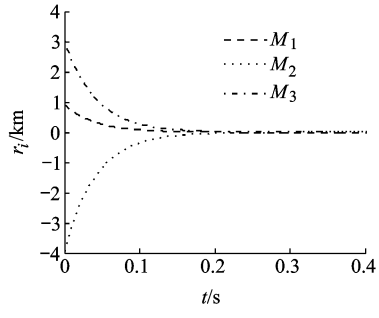


图 5　导弹与目标视线距离变化曲线

5　结　论

本文设计了一种针对机动目标齐射攻击的多弹网络化分布式协同制导律,针对机动目标采用一种增广比例导引方法实现导弹的制导. 为了实现多枚导弹的协同攻击,引入协同控制中常采用的网络一致性原理,实现导弹之间分布式协调,进而实现多导弹协同攻击. 基于分布式通信,各导弹仅需要和视距内邻域导弹进行通信,具有通信带宽小、可扩展性好的特点.

参考文献（References）

[1] Shaferman V, Shima T. Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Minneapolis: [s. n.], 2012

[2] McLain T W, Beard R W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative-timing missions[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1): 150-161

[3] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71-82

[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 (in Chinese)

[5] 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

[6] 赵世钰. 多飞行器协同制导方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2009
Zhao Shiyu. Multi-vehicle cooperative guidance law study[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009 (in Chinese)

[7] 邹丽,丁全心,周锐. 异构多导弹网络化分布式协同制导方法[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(12):1432-1435
Zou Li, Ding Quanxin, Zhou Rui. Distributed cooperative guidance for multiple heterogeneous networked missiles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(12): 1432-1435 (in Chinese)

[8] Ha I J, Hur J S, Song T L. Performance Analysis of PNG Laws for Randomly Maneuvering Targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(5): 713-721

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

[10] Wang Wei, Slotine J J E. Adaptive synchronization in coupled dynamic networks[R]. NSL Report 040202, 2003

(编　辑:刘登敏)