



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

C O N T R O L A N D D E C I S I O N



事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律

席阿行, 蔡远利

引用本文:

席阿行, 蔡远利. 事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3745–3754.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0807>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

考虑加速度约束的终端角度约束滑模制导律设计

Sliding-mode guidance law with acceleration and angle constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2511–2516 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0284>

基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467–2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律

席阿行, 蔡远利[†]

(西安交通大学 控制工程研究所, 西安 710049)

摘要: 为了减少多弹协同控制系统的计算负担与通信资源, 引入事件触发机制, 研究分布式微分对策制导律. 首先, 将分布式微分对策制导问题转化为分布式零和博弈问题, 利用自适应动态规划求解其事件触发的耦合 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程, 同时设计事件触发机制的触发条件和自适应评价网络权重的更新律, 提出一种事件触发机制的分布式微分对策制导律; 然后, 依据 Lyapunov 定理证明多弹协同系统的稳定性和评价网络估计权重误差的最终一致有界; 进而, 设计最小采样时间间隔以确保系统不出现 Zeno 行为; 最后, 通过仿真实例验证所提出制导律的有效性. 结果表明, 与传统的分布式微分对策制导律相比, 所提出的制导律对控制器状态更新次数可减少 65.36%, 极大地减少了控制系统的计算负担与通信资源.

关键词: 多弹协同制导; 事件触发机制; 分布式控制; 零和博弈; 自适应动态规划; Hamilton-Jacobi-Bellman 方程

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0807

引用格式: 席阿行, 蔡远利. 事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3745-3754.

Event-triggered-based distributed differential game guidance laws

Xi A-xing, Cai Yuan-li[†]

(Control Engineering Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reduce computational loads and save communication resources of cooperative multi-missile systems based on the event-triggered mechanism, the distributed differential game guidance laws are investigated. First, the cooperative multi-missile interception problem is converted into multi-player zero-sum differential games. The proposed guidance laws are derived by addressing the couple event-triggered-based Hamilton-Jacobi-Bellman equation, which is solved by using the adaptive dynamic programming technique. Meanwhile, adaptive weight tuning laws and event-triggered conditions are designed. The proposed guidance laws can guarantee the stability of the nonlinear multi-missile system, which is proved using the Lyapunov method. Then, the estimated weights of the neural network and consensus tracking errors are ensured to be uniformly ultimately bounded. Besides, a minimal inter-sample time is established for avoiding the Zeno behavior. Finally, some experiments are provided to illustrate the effectiveness of the proposed guidance laws. Compared with traditional distributed differential game guidance laws, the proposed guidance law reduces the number of state updates of the cooperative system controller by 65.36%. The computational burden and communication resources of the control system can be greatly reduced.

Keywords: cooperative multi-missile guidance laws; event-triggered mechanism; distributed control; zero-sum differential games; adaptive dynamics programming; Hamilton-Jacobi-Bellman equation

0 引言

智能博弈攻防对抗已成为未来战场不可避免的趋势, 面对智能机动目标, 传统的一对一制导方法已无法满足高效地饱和拦截. 近几年, 多弹协同制导策略在机动目标拦截上有着巨大优势, 引起了众多学者的关注^[1-3].

研究多弹协同制导一般是将问题转化为多弹协同一致性问题, 其一致性可通过剩余飞行时间或剩余

飞行距离实现. 大部分文献采用剩余飞行时间作为协同变量. 文献[4]设计了多弹剩余飞行时间方差以实现协同时间一致性, 通过扩展传统的比例导引法, 提出了合作型比例导引法. 但是, 基于剩余飞行时间来解协同一致性问题会因目标部分状态信息未知, 导致剩余飞行时间估计失效, 从而拦截失败. 文献[5]提出了领弹-从弹分布式剩余飞行距离观测器, 用来实现协同一致性跟踪. 文献[6]利用滑模控制设计了

收稿日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62203349); 创新特区项目(23-TQ01-04-ZT-01-011).

[†]通讯作者. E-mail: ylicai@mail.xjtu.edu.cn.

制导策略跟踪期望轨迹,采用剩余飞行距离收敛到零来确保飞行器成功拦截目标.相比于剩余飞行时间的制导策略,剩余飞行距离的制导策略不需要对剩余飞行时间进行估计,只需要较少的目标状态信息,更接近于实际战场的需求.然而,上述的协同制导律大多数是基于固定或低速运动目标设计的,而且各个导弹的最优性并没有考虑.

为了实现最优的机动目标拦截,微分对策提供了理论基础,其中,多弹协同系统被当作合作方,机动目标被当作对抗方,研究的是双方动态博弈过程^[7].一般地,微分对策分为两种研究思路:一种是在线性多弹模型基础上求解最优协同制导策略,如文献[8]基于零和博弈微分对策理论提出了最优协同制导律,并给出了该制导律的解析解,但所提出的最优控制律会随智能体个数的增加变得复杂;文献[9]提出了鲁棒多弹协同微分对策制导律,将最优控制问题转化为二次型最优控制问题,通过求解 Riccati 方程获得最优控制量.另一种是在非线性多弹协同模型上求解耦合的 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程,然而,相应的 HJB 方程解析解难以求解.幸运的是,自适应动态规划(adaptive dynamics programming, ADP)方法利用其非线性拟合特性为求解耦合的 HJB 方程提供了理论依据.如文献[10]针对有限时域最优控制问题,提出了一种改进的 ADP 算法求解非线性 HJB 方程;文献[11]在输入延迟的未知非线性系统中,提出了数据驱动分布式最优一致性控制方法,利用输入-输出数据解决了系统未知的问题.

上述提到的协同控制算法都是基于固定时间周期实现的.然而,面对复杂的多智能体系统,频繁的采样可能会产生由宽带受限而引起通信阻塞问题,从而破坏各个智能体之间的通信拓扑.如何利用最小的资源实现更好的控制效率有着很重要的意义.除此之外,在实际应用中,如果两次采样信号的误差都在可接受的范围内,则控制器的状态输入没有必要更新^[12].因此,基于事件触发机制的控制算法具有更高的应用价值.事件触发机制控制的关键是其控制器状态的更新频率,仅当两次采样信号的误差满足一定阈值时进行更新,这就减少了控制器的计算负担.其次,事件触发机制允许系统状态误差在达到触发阈值之前发生演化,但又不影响其系统的稳定性,这就减少了发送状态信号的数据量,从而减少了不必要的通信资源浪费.文献[13]基于事件触发的 ADP 技术,针对非线性多智能体系统,研究了分布式最优协调控制算法,并通过与固定采样时间周期机制对比发现,基

于事件触发机制可以避免冗余数据的传输.文献[14]研究了具有输入约束的离散非线性多智能体系统的一致性控制问题,采用在线学习算法获得最优控制策略,其评价网络为多层网络结构.然而,复杂的神经网络结构反而增加了系统的计算负荷.为了克服这个缺点,文献[15]在多智能体系统中研究了具有博弈触发条件的事件触发分布式零和微分对策问题,并利用单一评价神经网络逼近耦合 HJB 函数.但上述基于事件触发机制的控制算法研究都没有涉及非线性多弹协同制导问题,其相关研究文献甚少.然而,在多弹协同系统中,以最小的通信和计算资源实现机动目标拦截具有很大的应用价值.文献[16]提出了一种多导弹协同制导系统的近似误差事件触发分布式最优制导律,并利用 ADP 技术推导了一种基于时间触发机制的自适应神经网络参数更新律,但其事件触发的条件忽略了机动目标的影响.实际上,目标的机动性会影响闭环系统的稳定性和控制器的鲁棒性.

综上所述,为了以最小的通信与计算资源实现多弹协同拦截机动目标,本文提出一种事件触发机制的分布式微分对策制导律.首先,结合图论建立非线性多弹协同一致性模型,通过事件触发机制与微分对策理论求解多弹协同最优拦截策略和目标最优逃逸策略;其次,通过 ADP 方法求解事件触发的耦合 HJB 方程,并给出评价网络估计权重更新律和事件触发最小采样时间间隔.本文的主要贡献有以下两个方面:

1) 以减少多弹协同控制系统的计算负担和通信资源为出发点,重点解决事件触发机制下,多弹协同拦截机动目标的分布式制导问题.首先,与传统的固定时间分布式协同制导律相比,所提出的制导算法仅在事件触发条件满足时更新控制信号,能缓解控制系统的计算和通信负担;其次,虽然事件驱动机制与自适应动态规划方法相结合用于解决多智能体系统的一致性问题 and 跟踪问题已有很多研究结果,但是本文将多智能体分布式跟踪控制问题与事件触发的多弹协同微分对策制导问题相结合,提出了事件触发机制的分布式微分对策制导律,并证明所提出的制导算法能确保闭环系统的稳定性.

2) 将分布式微分对策制导问题转化为分布式零和博弈问题.首先,与已有的大部分研究多弹协同制导律的研究以剩余飞行时间作为协同变量不同,本文采用剩余飞行距离作为协同变量,这样可以避免剩余飞行时间的估计;其次,与事件驱动机制和自适应动态规划方法相结合解决多智能体一致性问题及跟踪问题的研究结果相比,本文提出了一种新颖的实现算

法,所设计的事件触发条件不仅仅依赖于系统状态和多弹间信息的更新,还考虑了目标控制量的影响;此外,提出了全新的评价网络权重更新律,与文献[15]设计的三层评价网络相比,本文设计了更简洁的评价网络;同时,为了避免学习数据的相关性,采用了经验回放技术。

1 问题描述与预备知识

本节首先描述多弹协同拦截目标问题,用图论描述智能体之间的通信拓扑关系;其次,基于事件触发机制推导分布式微分对策协同制导律。

1.1 多弹协同拦截问题描述

多弹协同拦截目标如图1所示。其中: M 、 T 分别为进攻弹与目标; V_l 、 a_l 、 γ_l ($l \in (M_i, T)$) 分别为导弹 i 与目标 T 的速度、加速度、航向角; λ_l 、 r_l ($l \in (1, N)$) 分别为导弹 i 与目标 T 的视线角和相对距离。考虑导弹 i 和目标 T 的自动驾驶仪具有一阶动态特性。

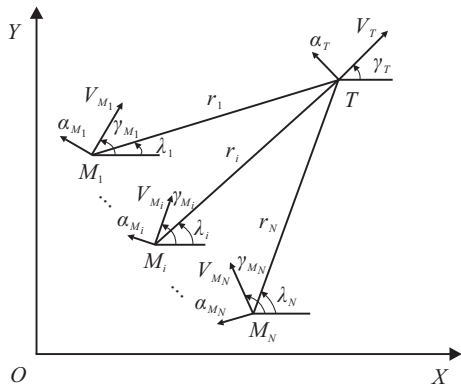


图1 多弹协同拦截示意

根据图1,导弹 i 与目标 T 的相对运动学方程为

$$\dot{r}_i = V_T \cos(\gamma_T - \gamma_i) - V_{M_i} \cos(\gamma_{M_i} - \lambda_i), \quad (1)$$

$$\dot{\lambda}_i = \frac{V_T \sin(\gamma_T - \gamma_i) - V_{M_i} \sin(\gamma_{M_i} - \lambda_i)}{r_i}, \quad (2)$$

$$\dot{r}_{M_i} = u_{M_i} / V_{M_i}, \quad (3)$$

$$\dot{\lambda}_T = u_T / V_T, \quad (4)$$

其中 u_{M_i} 和 u_T 分别是垂直于速度方向的控制输入。假设目标的加速度是有界的,即存在正常数 $u_{T \max}$, 满足 $u_T \leq u_{T \max}$ 。

本文采用剩余飞行距离实现多弹协同一致性,为了实现多弹协同拦截目标 T ,所有导弹在拦截过程必须满足以下3个条件:

- 1) 导弹 i 与目标 T 之间的相对距离 r_i 趋向于0,以确保导弹 i 能准确击中目标 T ;
- 2) 各导弹之间的相对距离 $\lim_{t \rightarrow \infty} |r_i - r_j|$ 趋向于0,以确保各导弹能同时命中目标点;
- 3) 各导弹之间的相对距离变化 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{r}_i - \dot{r}_j|$ 趋向于0,以确保各导弹与目标 T 的相对速率一致。

于0,以确保各导弹与目标 T 的相对速率一致。

定义 $x_i = [x_{1i} \ x_{2i}]^T$, 则上述多弹协同拦截过程采用状态空间方程可描述为

$$\dot{x}_i = f(x_i) + g(x_i)u_{M_i} + k(x_i)u_T. \quad (5)$$

其中: $f(x_i) = [x_{2i} \ \dot{\lambda}_i^2 x_{1i}]^T$, $g(x_i) = [0 \ \sin(\gamma_{M_i} - \lambda_i)]^T$, $k(x_i) = [0 \ -\sin(\gamma_T - \lambda_i)]^T$. 另外, $f(x_i) \in R^n$, $g(x_i) \in R^{n \times m}$, $k(x_i) \in R^{n \times 1}$ 均是连续可微的,不失一般性,系统 $f(x_i)$ 是局部Lipschitz连续的和 $f(0) = 0$,且协同系统是可控的。

根据式(2)和(5)可以看出,当 $|\gamma_{M_i} - \lambda_i| = 0$, $|\sin(\gamma_T - \lambda_i)| = 0$ 和 $r_i = 0$ 时,系统(5)是不稳定的。因此,多弹协同制导控制策略应满足以下定义域:

$$\Omega = \{|\gamma_{M_i} - \lambda_i| \neq 0, |\gamma_T - \lambda_i| \neq 0, r_i \neq 0\}. \quad (6)$$

1.2 图论

引入图论理论,多弹协同系统中各个导弹之间的通信拓扑关系可描述为 $G(v, E, A)$. 其中: 节点集合 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示所有导弹; 边集合 $E = (i, j) (i, j \in v)$ 表示各个导弹之间的信息交互; 邻接矩阵定义为 $A = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$, 当导弹 i 与导弹 j 之间有信息传输时,邻接矩阵定义为 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 度矩阵定义为 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, 另外,导弹 i 与目标 T 的通信拓扑关系定义为对角矩阵 $b = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$, 如果导弹 i 与目标 T 之间存在信息交互,则 $b_i = 1$; 否则 $b_i = 0$. 假设仅有导弹 i 与目标信息交互。

1.3 传统的微分对策制导律

假设目标 T 为领弹 M_0 , 其动态方程为

$$\dot{x}_T = \dot{x}_0 = f(x_0). \quad (7)$$

其中: x_0 为目标 T 的状态变量,方程 $f(x_0)$ 是可微的。

对于多弹协同拦截系统,导弹 i 与目标 T 的局部邻域跟踪一致性误差定义为

$$e_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) + b_i(x_i(t) - x_0(t)). \quad (8)$$

对式(8)求导,可得导弹 i 与目标 T 的局部邻域跟踪一致性误差动态方程为

$$\dot{e}_i(t) = f_{e_i}(t) + g_{e_i}(x_i)u_{M_i} + k_{e_i}(x_i)u_T - \sum_{j \in N_i} a_{ij}g_j(x_j)u_{M_j}. \quad (9)$$

其中: $f_{e_i}(t) = (b_i + d_i)f(x_i) - \sum_{j \in N_i} a_{ij}f(x_j) - b_i\dot{x}_0$, $g_{e_i}(x_i) = (b_i + d_i)g(x_i)$, $k_{e_i}(x_i) = (b_i + d_i)k(x_i)$.

针对多弹协同拦截系统,其主要目的是设计分布

式协同控制输入 u_{M_i} , 以确保所有导弹最终能同时一致收敛至目标位置, 即导弹 i 与目标 T 的局部邻域跟踪一致性误差趋向于零, 使以下协同性能指标函数最小:

$$J_i(e_i(0), u_{M_i}, u_{M_j}, u_T) = \frac{1}{2} \int_0^\infty e_i^T Q_{ii} e_i + u_{M_i}^T R_{ii} u_{M_i} + \sum_{j \in N_i} a_{ij} u_{M_j}^T R_{ij} u_{M_j} - \mu^2 u_T^T T_{ii} u_T dt. \quad (10)$$

其中: $Q_{ii} \in R^{n \times n}$ 为半正定矩阵, $R_{ii} \in R^{m \times m}$ 为正定矩阵且满足 $R_{ii} = v_{ii} v_{ii}^T$, $R_{ij} \in R^{m \times m}$ 和 $T_{ii} \in R^{n \times 1}$ 为对称半正定矩阵, μ 为正系数, u_{M_j} 为导弹 i 邻接导弹 j 的控制输入.

根据微分对策理论, 分布式多弹最优制导策略满足如下纳什均衡不等式:

$$J_i(u_{M_i}^*, u_{M_j}, u_T) \leq J_i(u_{M_i}^*, u_{M_j}, u_T^*) \leq J_i(u_{M_i}, u_{M_j}, u_T^*). \quad (11)$$

其中: 多弹协同系统作为合作方最小化协同性能指标函数; 相反地, 目标 T 作为对抗方最大化协同性能指标函数.

相应的耦合 Hamiltonian 方程为

$$H_i(e_i, \nabla J_i(e_i), u_{M_i}, u_T) = \frac{1}{2} \left(e_i^T Q_{ii} e_i + u_{M_i}^T R_{ii} u_{M_i} + \sum_{j \in N_i} a_{ij} u_{M_j}^T R_{ij} u_{M_j} - \mu^2 u_T^T T_{ii} u_T \right) + \nabla J_i^T(e_i) \dot{e}_i(t), \quad (12)$$

其中 ∇J_i 为代价函数对系统误差的偏导数.

根据 Bellman 最优原则, 对抗双方最优控制策略 $(u_{M_i}^*, u_T^*)$ 可通过求解以下方程的鞍点获得:

$$\min_{u_{M_i}} \max_{u_T} H_i(e_i, \nabla J_i^*(e_i), u_{M_i}, u_T) = 0. \quad (13)$$

因此, 传统的分布式微分对策制导策略和最优目标逃逸策略为

$$u_{M_i}^* = -R_{ii}^{-1} g_{e_i}^T(x_i) \nabla J_i^*(e_i), \quad (14)$$

$$u_T^* = (1/\mu^2) T_{ii}^{-1} k_{e_i}^T(x_i) \nabla J_i^*(e_i). \quad (15)$$

上述多弹协同微分对策制导策略是基于固定采样时间周期实现控制的, 控制器的状态更新是固定频率的, 这会造成不必要的计算资源和通信资源浪费.

注1 本文提出的多弹协同微分对策制导策略(14)是基于微分对策理论实现的, 其原理是对抗双方动态博弈的过程, 即多弹协同的最优拦截策略(14)是在假设来袭目标以最优逃逸策略(15)机动时求解的. 实际中, 目标的控制律往往不容易获得, 一般通过估计的方式获取目标的控制律.

2 事件触发机制的分布式微分对策制导律

为了减少多弹协同控制系统的计算和通信负担, 不同于固定采样时间机制, 本文采用事件触发机制实现多弹协同最优控制. 其基本原理是: 当系统的采样状态满足事件触发条件时, 控制器的状态进行更新并通过零阶保持器(ZOH)保持输入不变, 同时, 事件触发误差归零; 否则, 控制任务保持不变并取消状态传输, 这样就减少了不必要的数据传输.

定义事件触发时系统的状态为 $x_i(t_k^{(i)})$, 于是第 $t_k^{(i)}$ 触发时刻系统的状态 $x_i(t_k^{(i)})$ 与当前时刻 $x_i(t)$ 的误差定义为事件触发误差方程, 有

$$e_k^{(i)} = x_i(t_k^{(i)}) - x_i(t), \quad \forall t \in (t_k^{(i)}, t_{k+1}^{(i)}). \quad (16)$$

根据事件触发机制原理可知, 多弹协同系统中事件触发条件与协同系统状态和事件触发误差相关, 当第 $t_k^{(i)}$ 次事件触发设定阈值条件满足时, 导弹 i 的控制器根据事件触发时刻系统状态的采样数据进行更新并通过 ZOH 保持输入不变, 同时事件触发误差 $e_k^{(i)}$ 重新归零, 只有在下一次事件触发条件满足时, 导弹 i 控制器的采样状态才会进行下一次更新. 因此, 传统的多弹协同控制策略(14)转化为

$$u_{M_i}^*(e_k^{(i)}) = -R_{ii}^{-1} g_{e_i}^T(x_i(t_k^{(i)})) \nabla J_i^*(e_i). \quad (17)$$

式(17)即为本文提出的基于事件触发机制的多弹分布式微分对策制导策略.

注2 本文的导弹控制律(17)是事件触发驱动的, 目标的控制律(15)是时间驱动的, 故本文的控制策略不是完全事件驱动的. 这是因为在实际中, 导弹的控制系统是可以设计的, 所以采用事件触发驱动; 而来袭目标的控制策略难以获得, 一般通过估计的方式求解, 因此假设目标的控制律是基于采样时间驱动的.

在设计事件触发机制的触发条件之前, 先作以下假设.

假设1 分布式微分对策制导律是 Lipschitz 连续的, 且满足以下不等式:

$$\|u_{M_i}^*(e_i) - u_{M_i}^*(e_k^{(i)})\| \leq P \|e_k^{(i)}\|, \quad \forall t \in (t_k^{(i)}, t_{k+1}^{(i)}), \quad (18)$$

其中 P 是正系数.

引理1^[17] 如果假设1成立, 则基于固定采样时间周期 HJB 方程与基于事件触发机制 HJB 方程的关系如下所示:

$$\|H_i(e_i, \nabla J_i^*(e_i), u_{M_i}^*(e_k^{(i)}), u_T^*) - H_i(e_i, \nabla J_i^*(e_i), u_{M_i}^*(e_i), u_T^*)\| \leq$$

$$\lambda_{\max}(R_{ii})P^2\|e_k^{(i)}\|^2, \forall t \in (t_k^{(i)}, t_{k+1}^{(i)}), \quad (19)$$

其中 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 代表相应矩阵的最大特征值。

定理 1 针对多弹协同系统(5),考虑其局部邻域一致性动态误差方程为式(9),对于任何时刻 $t_k^{(i)}$,其事件触发机制的触发条件满足以下不等式:

$$\begin{aligned} \|e_k^{(i)}\|^2 \leq & \frac{(1-\eta^2)\lambda_{\min}(Q_{ii})\|e_i\|^2}{\lambda_{\max}(R_{ii})P^2} + \\ & \frac{u_{M_i}^{*\top}(e_k^{(i)})R_{ii}u_{M_i}^*(e_k^{(i)})}{\lambda_{\max}(R_{ii})P^2} - \frac{-\mu^2 u_T^{*\top} T_{ii} u_T^*}{\lambda_{\max}(R_{ii})P^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

且在事件触发的分布式微分对策制导策略(17)和最优逃逸策略(15)作用下,闭环系统仍是稳定的.式(20)中: η 是(0,1)的系数, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 代表相应矩阵的最小特征值.

证明 选择最优协同性能指标函数为Lyapunov方程 $L_i(t) = J_i^*(e_i)$,可以看出 $L_i(t) > 0, i \in N$.对Lyapunov方程求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_i(t) = \nabla J_i^{*\top}(e_i) & \left(f_{e_i} + g_{e_i}(x_i)u_{M_i}^*(e_k^{(i)}) + \right. \\ & \left. k_{e_i}(x_i)u_T^* - \sum_{j \in N_i} a_{ij}g_{e_j}(x_j)u_{M_j}^* \right). \end{aligned} \quad (21)$$

根据式(17)和(15),可得

$$\nabla J_i^{*\top}(e_i)g_{e_i}(x_i) = -u_{M_i}^{*\top}R_{ii}, \quad (22)$$

$$\nabla J_i^{*\top}(e_i)k_{e_i}(x_i) = \mu^2 u_T^{*\top}T_{ii}. \quad (23)$$

根据基于固定采样时间周期HJB方程,可得

$$\begin{aligned} \nabla J_i^{*\top}(e_i)f_{e_i} = & -\frac{1}{2}e_i^\top Q_{ii}e_i + \frac{1}{2}u_{M_i}^{*\top}R_{ii}u_{M_i}^* - \\ & \frac{1}{2\mu^2}u_T^{*\top}T_{ii}u_T^* - \frac{1}{2}\sum_{j \in N_i} a_{ij}u_{M_j}^{*\top}R_{ij}u_{M_j}^* + \\ & \sum_{j \in N_i} a_{ij}u_{M_j}^{*\top}R_{ij}u_{M_j}^*. \end{aligned} \quad (24)$$

将式(22)~(24)代入(21),并结合引理1,整理可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_i(t) = H_i(e_i, \nabla J_i^*(e_i), u_{M_i}^*(e_k^{(i)}), u_T^*) - & H_i(e_i, \nabla J_i^*(e_i), u_{M_i}^*, u_T^*) - \frac{1}{2}e_i^\top Q_{ii}e_i - \\ u_{M_i}^*(e_k^{(i)})^\top R_{ii}u_{M_i}^*(e_k^{(i)}) + \frac{1}{2\mu^2}u_T^{*\top}T_{ii}u_T^* - & \frac{1}{2}\sum_{j \in N_i} a_{ij}u_{M_j}^{*\top}R_{ij}u_{M_j}^* \leq \\ \lambda_{\max}(R_{ii})P^2\|e_k^{(i)}\|^2 - \lambda_{\min}(Q_{ii})\|e_i\|^2 - & \frac{1}{2}u_{M_i}^*(e_k^{(i)})^\top R_{ii}u_{M_i}^*(e_k^{(i)}) + \mu^2 u_T^{*\top}T_{ii}u_T^* \leq \\ -\frac{1}{2}\eta^2\lambda_{\min}(Q_{ii})\|e_i\|^2 + \mu^2 u_T^{*\top}T_{ii}u_T^* - & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(1-\eta^2)\lambda_{\min}(Q_{ii})\|e_i\|^2 - \frac{1}{2}u_{M_i}^*(e_k^{(i)})^\top \times \\ R_{ii}u_{M_i}^*(e_k^{(i)}) + \lambda_{\max}(R_{ii})P^2\|e_k^{(i)}\|^2. \end{aligned} \quad (25)$$

显而易见,当不等式(20)成立时,对于任意 $e_i \neq 0$ 满足 $\dot{L}_i(t) < 0$.根据Lyapunov定理,闭环系统是稳定的.□

注 3 本文设计的事件触发机制的触发条件(20)包括3项:第1项是根据系统的状态,反映了系统状态更新的影响;第2项是根据多弹的控制量,反映了多弹协同信息交互的影响;第3项是根据目标的控制量,反映了目标机动性的影响.

注 4 定理1虽然给出了事件触发机制的触发阈值,但在实际系统中存在Zeno行为,即在有限时间内出现无数次采样的现象,这对实际控制系统有着巨大伤害,因此,需要设计最小驻留时间来避免控制系统出现Zeno行为,这部分将在第4节证明.

注 5 从定理1可以看出,本文仅对多弹协同系统中各个导弹的控制器采取事件触发控制,而对目标采用固定采样时间的控制策略,这是因为目标的机动性一般很难获得,其次目标的控制系统和导弹的控制系统是不同的,目标的控制系统一般难以操作.

3 基于事件触发机制的ADP算法

为了实现上节提出的分布式制导律,本节利用ADP方法的非线性逼近能力,构建评价网络近似最优协同性能指标函数,并提出在线自适应评价网络估计权重更新律.参考RBF(radial basis function)神经网络,本文的评价网络结构为

$$J_i^*(e_i) = W_{qi}^\top \sigma_i(e_i) + \varepsilon_{qi}(e_i). \quad (26)$$

其中: W_{qi} 为评价网络的理想权重, $\sigma_i(e_i)$ 为激励函数, $\varepsilon_{qi}(e_i)$ 为评价网络的近似误差.

定义评价网络的残余误差为 ε_{cHi} ,有

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{cHi}} = -(\nabla \varepsilon_{qi}^\top)^\top & \left(f_{e_i} + k_{e_i}u_T^* - g_{e_i}R_{ii}^{-1} \cdot \right. \\ & \left. g_{e_i}^\top(x_k^{(i)})\nabla J_i(e_k^{(i)}) - \sum_{a_{ij}} g_{e_j}^\top(x_j)u_{M_j}^* \right), \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\nabla \varepsilon_{qi}$ 为评价网络的近似误差的偏导数.

实际上,评价网络的理想权重往往是未知的,因此,可以采用评价网络的估计权重代替理想权重来实现协同性能指标函数的近似,其网络结构为

$$\hat{J}_i(\hat{e}_i) = \hat{W}_{qi}^\top \sigma_i(e_i), \quad (28)$$

其中 \hat{W}_{qi}^\top 为评价网络理想权重的估计值.因此,用于实现的分布式微分对策制导策略和最优逃逸策略为

$$\hat{u}_{M_i}(e_k^{(i)}) = -R_{ii}^{-1}g_{e_i}^\top(x_i(t_k^{(i)}))\nabla \hat{J}_i(e_k^{(i)}), \quad (29)$$

$$\hat{u}_T = (1/\mu^2)T_{ii}^{-1}k_{e_i}^T(x_i)\nabla\hat{J}_i(e_i), \quad (30)$$

其中 $\nabla\hat{J}_i(e_i)$ 为式(28)的偏导数。

定义评价网络的估计误差为 e_{ci} ,有

$$e_{ci} = H_i(e_i, \hat{W}_{qi}, \hat{u}_{M_i}(e_k^{(i)}), \hat{u}_T). \quad (31)$$

为了确保评价网络的估计权重收敛到理想权重,即 $\hat{W}_{qi} \rightarrow W_{qi}$,需要设计评价网络的估计权重更新律使得如下目标函数最小化:

$$E_{ci} = \frac{1}{2}e_{ci}^T e_{ci} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p e_{ci}^T(t_k^{(i)}) e_{ci}(t_k^{(i)}). \quad (32)$$

根据式(32)可以看出,目标函数包括两项:第1项是用于最小化估计误差;第2项是表示存储数据,采用经验回放技术使事件触发时刻评价网络误差最小。因此,基于梯度下降法,评价网络估计权重的更新律为

$$\dot{\hat{W}}_{qi} = -\alpha_i \frac{\partial E_{ci}}{\partial \hat{W}_{qi}}. \quad (33)$$

定义评价网络估计权重的估计误差为 $\tilde{W}_{qi} = W_{qi} - \hat{W}_{qi}$,则评价网络估计误差可表达为

$$e_{ci} = -\tilde{W}_{qi}^T \nabla \sigma_i(e_i)(f_{e_i} + g_{e_i} \hat{u}_{M_i}(e_k^{(i)})) + k_{e_i} \hat{u}_T - \sum_{j \in N_i} a_{ij} g_{e_j} u_{M_j} + \varepsilon_{cHi} + \varepsilon_{ui}, \quad (34)$$

其中 $\varepsilon_{ui} = (v_i u_i^* - v_i u_i^*(e_k^{(i)}))^T (v_i u_i^* - v_i u_i^*(e_k^{(i)}))$ 。

对评价网络估计权重的估计误差求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{W}}_{qi} &= -\alpha_i \sigma_i(\sigma_i^T \tilde{W}_{qi} - \varepsilon_{cHi} - \varepsilon_{ui}) - \\ &\alpha_i \sum_{k=1}^p \sigma_{ik}(\sigma_{ik}^T \tilde{W}_{qi} - \varepsilon_{cHi}(t_k^{(i)}) - \varepsilon_{ui}(t_k^{(i)})). \end{aligned} \quad (35)$$

4 稳定性分析与事件触发最小采样时间间隔

本节分析所设计的事件触发条件满足时,所提出的制导算法能确保闭环系统的稳定性,并给出该机制下最小采样时间间隔。为了后续分析的方便,首先,给出以下合理假设。

假设2 针对多弹协同系统,非线性函数 $g(x_i)$ 和 $k(x_i)$ 是局部有界且连续的,即存在正常数 g_{M_i} 和 k_{M_i} ,使不等式 $\|g(x_i)\| \leq g_{M_i}$ 和 $\|k(x_i)\| \leq k_{M_i}$ 成立,且 $\|g(x_i) - g(x_k^{(i)})\| \leq L_{g_i} \|e_k^{(i)}\|$ 。

假设3 针对评价网络,其理想权重 W_{qi} 、激活函数 $\sigma_i(e_i)$ 、逼近误差 ε_{qi} 和激活函数的偏导数 $\nabla \sigma_i(e_i)$ 均有界,即满足不等式 $\|W_{qi}\| \leq W_{qiM}$, $\|\sigma_i(e_i)\| \leq \sigma_{iM}(e_i)$, $\|\nabla \sigma_i(e_i)\| \leq \nabla \sigma_{iM}(e_i)$ 和 $\|\varepsilon_{qi}\| \leq \varepsilon_{qi}(e_i)$,其中 W_{qiM} 、 $\sigma_{iM}(e_i)$ 、 $\nabla \sigma_{iM}(e_i)$ 、 $\varepsilon_{qi}(e_i)$ 均为正常数。

定理2 考虑多弹协同系统(5),局部邻域跟踪一

致性误差动态方程为式(9),设计的协同性能指标为式(10),在假设2和假设3成立的条件下,所设计的事件触发分布式微分对策制导律为式(17),目标最优逃逸策略为式(15),其事件触发条件满足式(20),评价网络权重更新律为式(33),如果评价网络权重误差满足以下不等式:

$$\|\tilde{W}_{qi}\|^2 \geq \frac{\frac{\alpha_i^2}{4} \sum_{k=1}^{p+1} (\varepsilon_{cHi \max} - \varepsilon_{ui \max})}{(\alpha_i - 1) \lambda_{\min}(G_i)}, \quad (36)$$

则闭环系统是稳定的,并且评价网络估计误差最终一致有界。

证明 Lyapunov方程为

$$L_i = L_{1i} + L_{2i} + L_{3i}. \quad (37)$$

其中: $L_{1i} = J_i^*(e_i)$ 是固定时间触发机制的最优代价函数, $L_{2i} = J_i^*(e_k^{(i)}(t_k^{(i)}))$ 是固定时间触发机制的最优代价函数, $L_{3i} = \frac{1}{2} \dot{\tilde{W}}_{qi}^T \dot{\tilde{W}}_{qi}$ 是评价网络权重估计误差函数。

情形1:事件不触发,即 $L_{2i} = 0$ 。对 L_{1i} 和 L_{3i} 分别求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_{1i} &= -\frac{1}{2} e_i^T Q_{ii} e_i + \frac{1}{2} u_{M_i}^*{}^T R_{ii} u_{M_i}^* - \\ &\frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} a_{ij} u_{M_j}^*{}^T R_{ij} u_{M_j}^* + \frac{1}{\mu^2} u_T^T T_{ii} \hat{u}_T - \\ &\frac{1}{2\mu^2} u_T^*{}^T T_{ii} u_T^* - u_{M_i}^*{}^T R_{ii} u_{M_i}^*(e_k^{(i)}). \end{aligned} \quad (38)$$

进一步,利用公式分解可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_{1i} &= -\frac{1}{2} e_i^T Q_{ii} e_i + \frac{1}{2} \|v_{ii}^T (u_{M_i}^* - u_{M_i}^*(e_k^{(i)}))\|^2 - \\ &\frac{1}{2} \|v_{ii}^T - u_{M_i}^*(e_k^{(i)})\|^2 - \frac{1}{2} \|t_{ii}^T (u_T^* - \hat{u}_T)\|^2 + \\ &\frac{1}{2\mu^2} \hat{u}_T^T T_{ii} \hat{u}_T - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} a_{ij} u_{M_j}^*{}^T R_{ij} u_{M_j}^*. \end{aligned} \quad (39)$$

根据假设1~假设3和控制信号的有界性,可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_{1i} &\leq -\frac{1}{2} \eta^2 \lambda_{\min} Q_{ii} \|e_i\|^2 - \frac{1}{2} (1 - \eta^2) \times \\ &\lambda_{\min} Q_{ii} \|e_i\|^2 + \frac{1}{2} \lambda_{\max} R_{ii} P \|e_k^{(i)}\|^2 - \\ &\frac{1}{2} \|v_{ii}^T - u_{M_i}^*(e_k^{(i)})\|^2 + \frac{1}{2\mu^2} \|\hat{u}_T\|^2. \end{aligned} \quad (40)$$

定义 $G_i = \sigma_i \sigma_i^T + \sum_{k=1}^p \sigma_{ik} \sigma_{ik}^T$,利用Young不等式,可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_{3i} &\leq -\alpha_i \lambda_{\min}(G_i) \|\tilde{W}_{qi}\|^2 + \alpha_i \tilde{W}_{qi}^T \left(\sigma_i(\varepsilon_{cHi} - \right. \\ &\left. \varepsilon_{ui}) + \sum_{k=1}^p \sigma_{ik}(\varepsilon_{cHi}(t_k) - \varepsilon_{ui}(t_k)) \right). \end{aligned} \quad (41)$$

根据假设3,可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_{3i} \leq & -(\alpha_i - 1)\lambda_{\min}(G_i)\|\tilde{W}_{qi}\|^2 + \\ & \frac{\alpha_i^2}{4} \sum_{k=1}^p (\varepsilon_{cHiM} - \varepsilon_{uiM}). \end{aligned} \quad (42)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{L}_i \leq & -\frac{1}{2}e_i^T Q_{ii} e_i - \frac{1}{2}R_{ii}\|u_{Mi}^*(e_k^{(i)})\|^2 + \\ & \frac{1}{2}R_{ii}P\|e_k^{(i)}\|^2 + \frac{1}{2\mu^2}\|\dot{u}_T\|^2 - \\ & (\alpha_i - 1)\lambda_{\min}(G_i)\|\tilde{W}_{qi}\|^2 + \\ & \frac{\alpha_i^2}{4} \sum_{k=1}^p (\varepsilon_{cHiM} - \varepsilon_{uiM}). \end{aligned} \quad (43)$$

根据事件触发条件,在评价网络估计权重满足不等式(36)时,对于任意 $x \neq 0$ 都有 $L_i < 0$,根据 Lyapunov 稳定性定理可知闭环系统是渐近稳定的。

情形 2: 事件触发条件满足,即事件被触发,闭环系统的控制系统表现出离散系统特性. 因此,将式(37)的差分方程选择为 Lyapunov 方程

$$\begin{aligned} \Delta L_{fi} = \Delta L_{1i} + \Delta L_{2i} + \Delta L_{3i} = \\ J_i^*(e_{k+1}^{(i)}) - J_i^*(e^{(i)}(t^-)) + J_i^*(e_{k+1}^{(i)}) - \\ J_i^*(e_k^{(i)}) + \frac{1}{2}(\tilde{W}_{qi}^T(e_{k+1}^{(i)})\tilde{W}_{qi}(e_{k+1}^{(i)}) - \\ \tilde{W}_{qi}^T(e^{(i)}(t^-))\tilde{W}_{qi}(e^{(i)}(t^-))). \end{aligned} \quad (44)$$

其中: $e^{(i)}(t^-) = \lim_{\tau \rightarrow 0} e^i(t_{k+1} - \tau)$, $\tau \in (0, t_{k+1} - t_k)$.

根据系统状态的连续性和评价网络估计误差的有界性,可得 $\Delta L_{1i} \leq 0$, $\Delta L_{3i} \leq 0$,则

$$\Delta L_{2i} \leq J_i^*(e_{k+1}^{(i)}) - J_i^*(e_k^{(i)}) \leq -\psi(e_{\tau}^{(i)}). \quad (45)$$

其中: $\psi(\cdot)$ 是 K 类函数, $e_{\tau}^{(i)} = e_{k+1}^{(i)} - e_k^{(i)}$ [17]. 因此,在事件触发条件满足时 $\Delta L_{fi} < 0$.

综合以上两种情况,在事件触发条件满足式(20)且评价网络权重估计误差满足式(36)时,在事件触发机制的控制策略作用下,闭环系统是稳定的且评价网络估计误差是最终一致有界的. □

注 6 评价网络估计误差最终一致有界与拦截的精准效果有着间接联系. 评价网络估计误差最终一致有界说明估计评价网络(28)能有效地拟合理想评价网络(26),从而进一步说明了本文提出的事件触发分布式微分对策制导律(17)的有效性. 定理 2 证明了针对多弹协同系统(6),考虑其局部邻域一致性动态误差方程为式(9),所提出的制导律能确保闭环系统的稳定性,即系统的状态从初始状态转移到平衡状态. 系统的状态量为导弹与目标的剩余飞行距离 r_i ,因此在所提出的制导律控制下,导弹与目标的剩余飞行距离 r_i 会收敛到平衡状态(导弹的杀伤半径内). 综

上所述,评价网络估计误差最终一致有界在一定程度上确保了导弹拦截的精准效果.

定理 3 针对误差动态系统(9),在事件触发分布式微分对策制导律(17)和触发条件(20)作用下,当系统不会出现 Zeno 行为时,事件触发机制最小采样时间阈值应满足以下不等式:

$$t_{k_{i+1}} - t_{k_i} \geq (1/k_i) \ln(1 + \bar{k}_k) \geq 0. \quad (46)$$

其中: $\bar{k}_k = k_1 e_k^{(i)}(t_{k+1}) / (k_1 \|e_i(t_k)\| + k_2)$, $e_k^{(i)}(t_{k+1}) = e_i(t_k) - e_i(t_{k+1})$, k_1, k_2 均为正常数.

证明 第 i 次的采样时刻误差定义为 $t_{i+1} - t_i$,则最小驻留时间为

$$\Delta t_{\min} = \min_{i \in \mathbb{N}} \{t_{i+1} - t_i\}. \quad (47)$$

根据假设 2,可得

$$\|u_{Mi}(e_k^{(i)})\| \leq \frac{g_{e_i} \max}{2R_{ii}} \|\hat{W}_{qi} \sigma_i(e_i)\|, \quad (48)$$

$$u_T \leq \frac{k_i \max}{2T_{ii}} \|\hat{W}_{qi} \sigma_i(e_i)\|. \quad (49)$$

将式(48)和(49)代入(9),可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) = \\ k_1 \|e_k^{(i)}(t_k) - e_k^{(i)}\| + k_2 \leq \\ -k_1 \|e\| + k_1 \|e_k^{(i)}(t_k)\| + k_2, t \in [t_i, t_{i+1}]. \end{aligned} \quad (50)$$

其中 $k_2 = \frac{g_{e_i} \max}{2R_{ii}} \|\hat{W}_{qi} \sigma_i(e_i)\| + \frac{k_i \max}{2T_{ii}} \|\hat{W}_{qi} \sigma_i(e_i)\|$.

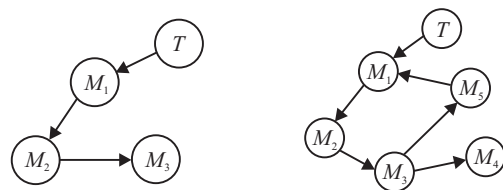
其初始的采样时刻满足 $e_k^{(i)}(t_k) = x_k^{(i)}(t_k) - x_i(t) = 0$,根据比较定理[18],可得

$$\|e_j\| \leq \frac{k_1 \|e_k^{(i)}(t_k)\| + k_2}{k_1} (e^{k_1(t-t_k)} - 1). \quad (51)$$

则事件触发机制的最小采样时间间隔满足不等式(46)时,事件触发机制的最小采样时间间隔大于 0,这样就可以确保闭环系统不会出现 Zeno 行为. □

5 仿真与分析

为了说明本文所提出事件触发分布式微分对策制导律的有效性,设计两组通信方式,其拓扑结构如图 2 所示,导弹和目标的飞行速度分别为 $V_{M_i} = 750 \text{ m/s}$ 和 $V_T = 600 \text{ m/s}$. 导弹 1 的初始位置为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m})$,初始航向角为 30° ; 导弹 2 的初始位置为



(a) 通信拓扑 1

(b) 通信拓扑 2

图 2 多弹协同系统通信拓扑图

(1 000 m, 0 m), 初始航向角为 45°; 导弹 3 的初始位置为 (2 000 m, 0 m), 初始航向角为 60°; 导弹 4 的初始位置为 (0 m, 1 000 m), 初始航向角为 30°; 导弹 5 的初始位置为 (0 m, 2 000 m), 初始航向角为 10°; 目标 T 的初始位置为 (8 000 m, 0 m), 初始航向角为 125°.

评价网络的结构为 1-4-1, 激活函数为 $\sigma_i(e_i) = [e_{i1}^2, e_{i1}e_{i2}, e_{i2}^2, e_{i1}^2e_{i2}^2]^T$; 导弹 1 的初始网络权重为 $W_1 = [10, 10, 10, 10]^T$; 导弹 2~导弹 5 的初始网络权重是 $[0, 1]$ 之间的随机数; 矩阵设置为 $Q_{ii} = 10I, R_{ii} = 10I, T_{ii} = I$; 系数 $P = 1, N = 50, \mu = 3, \eta = 0.2, \tau_{M_i} = 0.1, \tau_T = 0.1$; 学习率 $\alpha_i = 0.3$; 导弹杀伤半径为 $r_i \leq 3$ m, 即目标出现在导弹一定攻击范围内认为导弹拦截任务完成.

5.1 拦截常值机动目标

在对战场景中, 假设目标 T 以固定加速度运动, 即 $a_T = 30 \text{ m/s}^2$. 多弹以本文提出的控制策略 (17) 进行拦截, 通信拓扑结构如图 2(a) 所示, 其对抗结果如图 3 所示. 多弹协同的拦截过程如图 3(a) 所示, 各个导弹的运动轨迹表明, 所有导弹都能成功击中常值机动目标. 图 3(b) 为导弹 i 与目标 T 运动过程中相对距离的变化, 结果表明, 所有导弹都能在 12 s 同时成功拦截目标. 多弹的加速度变化曲线如图 3(c)、(d)、(e) 所示, 因为事件触发机制会使系统的控制信号表现出离散特性, 所以加速度曲线出现波动, 可以看出, 协同控制系统的信号改变是依据事件触发满足的条件. 另外, 所有的控制信号都在合理的过载范围内.

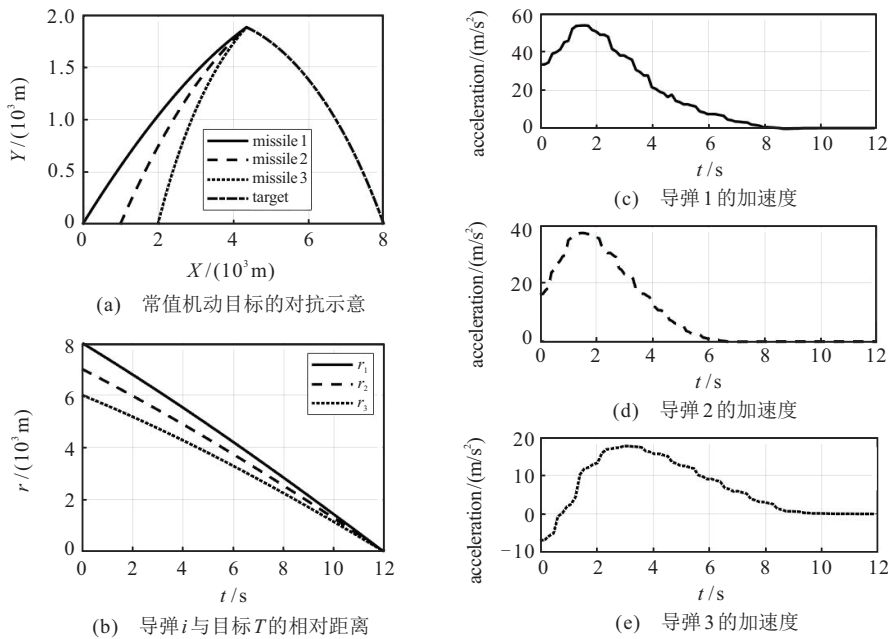


图 3 场景 1 对抗结果

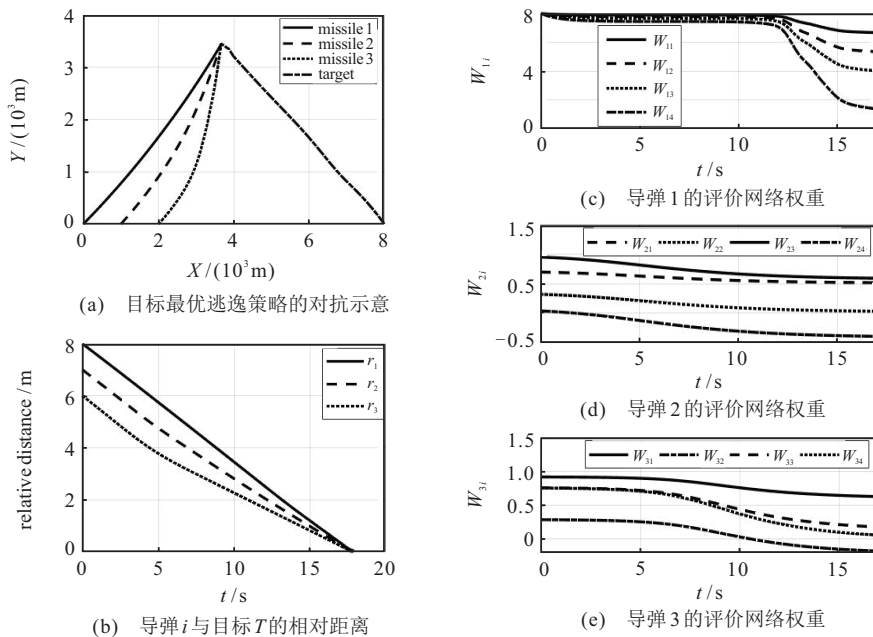


图 4 场景 2 对抗结果

5.2 与传统的分布式微分对策制导律对比

在对战场景中,假设目标以最优逃逸控制策略(15)进行机动,多弹分别采用时间触发的微分对策制导律(14)和事件触发的微分对策制导律(17)实现拦截,通信拓扑结构如图2(a)所示,其拦截过程及结果如图4所示.需要指出的是,多弹采用这两种控制策略时,其主要区别是控制器状态更新时刻与更新次数不同,本文对状态更新次数进行了对比,结果如表1所示.

目标弹以最优逃逸策略运动时,多弹协同拦截过程如图4(a)所示,结果表明所有导弹都能成功击中机动目标.进一步,图4(b)为各个导弹与目标的相对距离变化曲线,结果显示所有相对距离在17.9s时同时收敛到0.1m,说明所有导弹都能同时击中目标.图4(c)、(d)、(e)为评价网络估计权重曲线的变化,表明所

表1 两种制导算法的对比结果

智能体	采样次数 n		减少比例 /%
	固定时间采样	事件触发采样	
导弹1	179	63	64.80
导弹2	179	71	60.33
导弹3	179	52	86.03
共计	537	186	65.36

有导弹的估计权重都能收敛到一定的合理范围,从而表明了所设计的评价网络估计权重更新律的有效性.

图5为事件触发机制下各个导弹的采样时刻与采样间隔.可以看出:基于事件触发机制的采样时刻是在满足一定条件时进行的,这大大减少了控制系统的通信资源;另外,所有的采样间隔都大于0,表明系统不会出现Zeno现象.

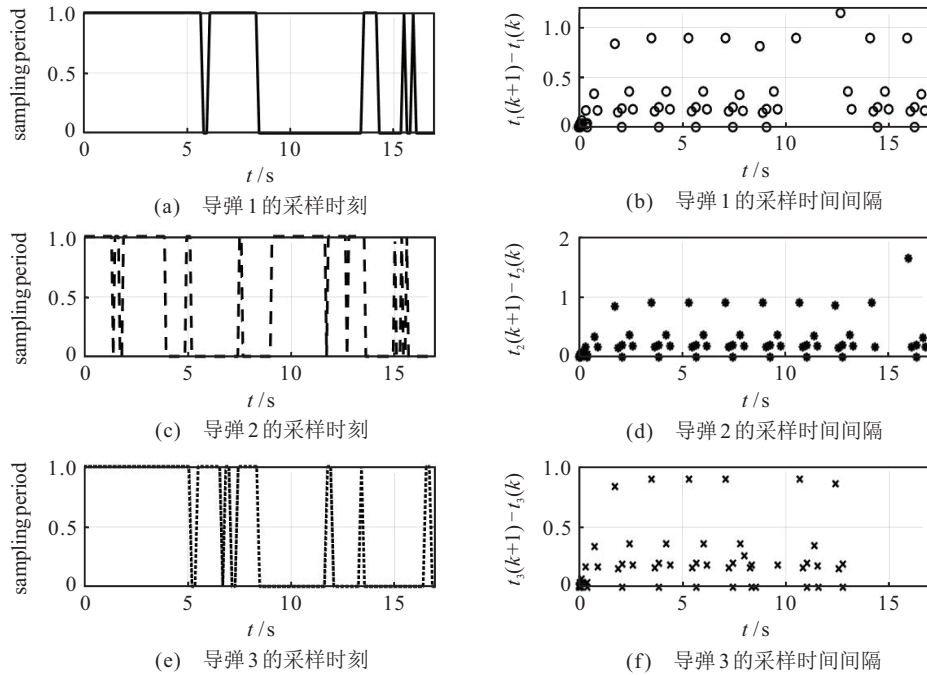


图5 事件触发机制导弹的采样时刻与采样间隔

为了进一步说明所提出制导算法的有效性,与传统的微分对策制导策略进行了比较,其对比结果如表1所示,假设固定采样时间机制的采样频率为0.1s.

从表1中可以看出,在事件触发机制下,所有导弹控制器采样更新次数都比固定时间机制的少,这表明本文所提出的制导策略可以有效减少多弹协同系统的通信资源.此外还可以看出,与固定采样时间机制相比,在本文提出制导算法的框架下,导弹控制器的采样次数依次减少了64.80%、60.33%和65.36%.总的控制器采样次数减少了65.36%,进一步说明了本文算法可以有效地减少控制器的计算负担和通信资源.

5.3 拦截正弦机动目标

为了进一步说明本文所提出微分对策制导律的适用性,本场景中,选择多弹协同系统通信拓扑结构如图2(b)所示.目标采用正弦机动, $a_T = 100 \sin t$.其对抗结果如图6所示.

图6(a)为5枚导弹与正弦机动目标对抗过程示意图,结果表明多弹协同实现了正弦目标的拦截.图6(b)为各导弹与目标运动过程相对距离变化曲线,结果显示,所有导弹都能在11.5s内同时拦截正弦机动目标.另外,对比5.1节实验可以发现,在复杂的多弹协同系统通信拓扑结构下,本文提出的算法仍适用.

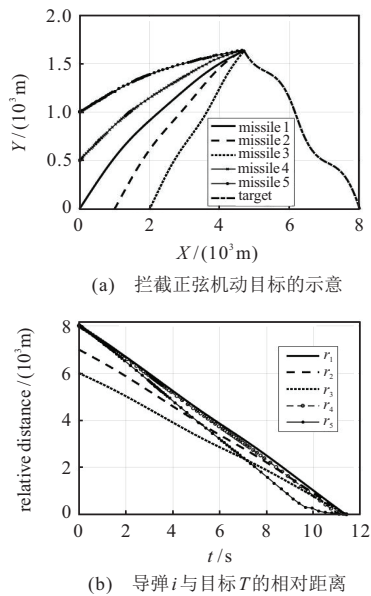


图6 场景3对抗结果

6 结论

本文基于事件触发机制研究分布式多弹协同拦截问题,提出了事件触发机制的分布式微分对策制导律.设计了事件触发满足的条件和评价网络估计权重的更新律,采用事件触发的自适应动态规划方法拟合协同性能指标函数实现了本文提出的制导策略,同时给出了事件触发机制的最小采样时间阈值.通过仿真验证了本文所提出的制导策略能成功击中机动目标,与传统的微分制导策略相比,可以减少多弹协同控制系统不必要的计算负担和通信资源,大大提升控制系统的性能.在未来的研究中,应考虑实际情况下目标控制律的获得;还应考虑有限时间和不同约束角的多弹协同控制策略以符合实际需求.

参考文献(References)

- [1] Ma G X, Zhang Y A. Time-cooperative distributed guidance law design for multi-missiles[J]. Control and Decision, 2014, 29(5): 843-847.
- [2] Yu H, Dai K R, Li H J, et al. Distributed cooperative guidance law for multiple missiles with input delay and topology switching[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(17): 9061-9085.
- [3] Chen Z Y, Yu J L, Dong X W, et al. Three-dimensional cooperative guidance strategy and guidance law for intercepting highly maneuvering target[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 485-495.
- [4] 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.
- [5] Zhou J L, Lü Y Z, Li Z K, et al. Cooperative guidance law design for simultaneous attack with multiple missiles against a maneuvering target[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2018, 31(1): 287-301.
- [6] Yang Z, Lin D F, Zang L Y. Impact time control guidance law considering seeker's field-of-view constraint without time-to-go information[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20(3): 412-417.
- [7] Friedman A. Differential games[M]. America: Courier Corporation, 2013: 58-75.
- [8] Perelman A, Shima T, Rusnak I. Cooperative differential games strategies for active aircraft protection from a homing missile[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(3): 761-773.
- [9] Liu F, Dong X W, Li Q D, et al. Robust multi-agent differential games with application to cooperative guidance[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111: 106568.
- [10] Lin X F, Ding Q. Adaptive dynamic programming optimal control based on approximation error of critic network[J]. Control and Decision, 2015, 30(3): 495-499.
- [11] Zhang H P, Yue D, Dou C X, et al. Data-driven distributed optimal consensus control for unknown multiagent systems with input-delay[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(6): 2095-2105.
- [12] Wu X J, Chen S M. Fixed-time group consensus control for nonlinear multi-agent systems based on event-triggered mechanism[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1278-1285.
- [13] Yao D Y, Li H Y, Lu R Q, et al. Event-triggered guaranteed cost leader-following consensus control of second-order nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(4): 2615-2624.
- [14] Peng Z N, Luo R, Hu J P, et al. Distributed optimal tracking control of discrete-time multiagent systems via event-triggered reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(9): 3689-3700.
- [15] Sun J L, Long T. Event-triggered distributed zero-sum differential game for nonlinear multi-agent systems using adaptive dynamic programming[J]. ISA Transactions, 2021, 110: 39-52.
- [16] Long T, Cao Y, Sun J L, et al. Adaptive event-triggered distributed optimal guidance design via adaptive dynamic programming[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(7): 113-127.
- [17] Xue S, Luo B, Liu D R. Event-triggered adaptive dynamic programming for zero-sum game of partially unknown continuous-time nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(9): 3189-3199.
- [18] Vidyasagar M. Nonlinear systems analysis[M]. The 2nd edition. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002: 163-175.

作者简介

席阿行(1992—),男,博士生,从事飞行器制导与控制、协同制导等研究, E-mail: xiap0310@stu.xjtu.edu.cn;
蔡远利(1963—),男,教授,博士,从事飞行器制导与控制、智能信息处理等研究, E-mail: ylicai@mail.xjtu.edu.cn.