

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.07.005

导弹拦截的混杂对策系统建模研究

郝丽娜, 曹瑞珉, 王凤立, 白国力

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 导弹拦截系统中既存在轨迹的连续变化过程, 也存在策略的选择问题, 单独采用微分对策和事件对策均无法有效描述该系统的混杂特性. 将该过程看作一类混杂系统, 提出一种导弹拦截过程 (missile interception process, MIP) 的混杂对策建模方法. 基于混杂随机时延 Petri 网 (hybrid stochastic timed Petri net, HSTPN) 建立导弹拦截事件对策模型, 结合导弹飞行过程的动力学模型建立拦截过程的微分对策模型; 以“民兵Ⅲ”导弹作为进攻弹, 对 MIP 的混杂过程进行实例仿真. 结果证明, 采用混杂对策建立的导弹拦截混杂描述方案, 既可以较好地描述导弹轨迹的连续变化过程, 也可以描述策略的选择问题.

关键词: 导弹拦截; 混杂对策; 混杂随机时延 Petri 网 (HSTPN); 事件对策; 微分对策

中图分类号: TJ 765.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)07-0931-06

Research on Modeling of Hybrid Game System for Missile Interception

HAO Li-na, CAO Rui-min, WANG Feng-li, BAI Guo-li

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HAO Li-na, E-mail: haolina@me.neu.edu.cn)

Abstract: In the missile defense system, there is not only the continuously evolving of trajectories, but also the decision of the event strategy. The differential game and the event game cannot effectively describe the hybrid characteristics alone. Therefore, the missile defense system was regarded as a kind of hybrid system, and hybrid game modeling method of missile interception process (MIP) was proposed. Then the event game model of missile interception was established based on the HSTPN (hybrid stochastic timed Petri net), and the differential game model of the missile interception process was established based on the dynamic model of the missile. Taking the “Minuteman III” as the example, the hybrid process was simulated with some practical cases. It was turned out to be that the hybrid interception description scheme based on hybrid games can describe not only the continuous trajectories of missile, but also selection of strategy.

Key words: missile interception; hybrid game; hybrid stochastic timed Petri net; event game; differential game

导弹进攻和拦截问题是军事理论研究的一个重要课题, 自弹道导弹问世以来, 凭借其反应快、射程远、精度高、威力大以及可全天候作战等独特优势, 在现代战争中发挥重要作用, 被各国列为“杀手锏”. 与此同时, 随着反导技术的发展, 以美、俄等大国为首的国家相继建立了全方位的反导体系以应对弹道导弹的威胁.

在导弹拦截过程 (missile interception process, MIP) 建模研究方面, 大多数学者通常将该过程视为连续变量动态系统, 采用微分对策作为处理工具^[1]. Faruqi^[2] 利用 Riccati 微分方程和反馈引导增益, 推导出闭合形式的微分对策表达式; Yang 等^[3] 以双方的误差距离和能量最小为优化目标, 建立导弹中段的躲避策略; Battistini 等^[4] 将自归纳环路综合卡尔曼滤波器的协方差矩阵信

息应用于追逃微分对策框架中,能够在遗漏距离和可观察性方面改善碰撞性能;Turetsky 等^[5]采用混合微分对策构建最优逃避策略,应用于导弹拦截过程.Ramana 等^[6]基于 Apollonius 环理论为导弹追逃微分对策中的高速目标逃逸制定逃避策略.

然而,MIP 中除了轨迹的连续变化过程外,还存在一系列策略选择过程,如进攻弹的躲避策略和拦截弹的拦截策略,应采用事件对策作为处理工具. Shinar 等^[7]将导弹追逃场景归纳为不完全信息零和博弈,总结了一套突防概率评价方法. Shinar 等^[8]采用离散动态博弈对反导防御场景建模,给出了博弈的鞍点解决方案;Ha 等^[9]采用随机博弈理论,结合动态规划计算博弈的均衡策略和收益双值矩阵,对空战对抗过程建模;Han 等^[10]将综合导弹防御系统的位置优化问题视为三阶段完美信息动态零和博弈的建模,通过枚举对抗双方的策略,进行博弈树展开,给出子博弈精炼纳什均衡;雷刚等^[11]基于博弈论设计机动策略库,确定弹上机动策略.

导弹拦截系统建模过程中,既存在拦截弹和进攻弹轨迹变化问题,属于连续变量动态系统,应采用微分对策作为处理工具;也存在进攻策略和拦截策略问题,属于离散事件动态系统,采用事件对策作为处理工具. 微分对策常用的建模方法为双输入微分方程,事件对策过程常用的建模方法为博弈树和机器博弈^[12]. 但导弹拦截混杂过程中,包含离散过程、连续过程、时间进程、随机现象

以及冲突现象等混杂特性. 另外,从博弈要素的角度来看,导弹拦截混杂对策系统的策略集非常丰富(包括连续策略和离散策略),具有信息集不完全的特点,博弈的收益不仅与策略本身相关,而且与策略的时机、飞行轨迹的演化以及事件的随机性相关,但现有博弈树无法对上述因素进行有效描述. 单独采用微分对策和事件对策均无法有效描述该系统的混杂特性. 因此 MIP 可看作一类混杂系统,应采用混杂对策作为处理工具. 徐心和等^[13]采用混杂对策描述了一个典型空战实例,详细介绍了混杂对策问题的内容和处理方法,揭示了混杂对策系统的运行机制.

本文针对导弹追逃问题的混杂特性,设计追逃过程的混杂随机时延 Petri 网(hybrid stochastic timed Petri net, HSTPN)模型,建立一套导弹追逃过程的混杂描述方案. 通过导弹追逃实例仿真,验证该模型的合理性.

1 MIP 事件对策层建模

进攻弹在进攻过程中,采用机动变轨和滑翔变轨进攻策略,使导弹防御系统难以预知进攻弹轨迹,造成反导系统拦截弹的脱靶量增大,进而突破防御系统的拦截;而拦截系统为了拦截来袭导弹,再入段通常采用“阻塞式”拦截策略,包括“1 拦 1”和“2 拦 1”. HSTPN 理论研究在文献[14]中详细讲述. 以再入段的 MIP 为例,建立基于 HSTPN 的导弹拦截事件对策层模型,如图 1 所示.

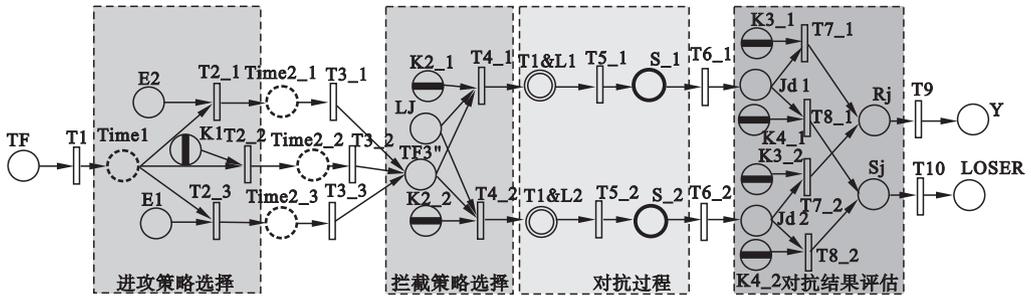


图 1 基于 HSTPN 的 MIP 模型
Fig. 1 HSTPN based MIP model

HSTPN 中各符号的含义如图 2 所示.

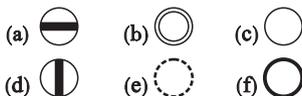


图 2 HSTPN 各符号的含义
Fig. 2 Definition of each symbol in HSTPN

库所和变迁的含义分别如表 1 和表 2 所示.

2 MIP 微分对策层建模

进攻弹的运行轨迹建立在发射坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 中,拦截弹的运行轨迹建立在拦截坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 中,两组坐标系的位置关系如图 3 所示. 由于来袭导弹近似在纵向铅垂平面 $X'_L O'_L Y'_L$ 内飞行,

(a) —拦截控制库所; (b) —连续库所; (c) —离散库所;
(d) —进攻控制库所; (e) —时间库所; (f) —随机库所.

因此将此平面定义为攻击平面,如图 4 所示。

表 1 MIP 模型中库所的含义

Table 1 Definition of the places in the MIP

符号	类型	含义
TF	离散型	进入再入段的弹头
Time1	时间型	弹头释放策略时机
E1	离散型	机动变轨
E2	离散型	滑翔变轨
Time2_1	时间型	采取滑翔变轨后的剩余飞行时间
Time2_2	时间型	弹头无进攻策略的剩余飞行时间
Time2_3	时间型	采取机动变轨后的剩余飞行时间
TF3''	离散型	再入段结束时的弹头
LJ	离散型	再入段拦截系统
K1	进控型	弹头无进攻策略选择控制
T1&L1	连续型	对抗状态的 1 枚弹头和 1 枚拦截弹
S_1	时间型	1 拦 1 过程按拦截概率产生结果
Jd_1	离散型	1 拦 1 拦截结果
T1&L2	连续型	对抗状态的 1 枚弹头和 2 枚拦截弹
S_2	时间型	2 拦 1 过程按拦截概率产生结果
Jd_2	离散型	2 拦 1 拦截结果
Sj	离散型	弹头再入段拦截成功
LOSER	离散型	弹头再入段进攻失败
Rj	离散型	弹头再入段拦截失败
Y	离散型	弹头进攻成功
K2_1	拦控型	1 拦 1 策略控制
K3_1	拦控型	1 拦 1 拦截失败控制
K4_1	拦控型	1 拦 1 拦截成功控制
K2_2	拦控型	2 拦 1 策略控制
K3_2	拦控型	2 拦 1 拦截失败控制
K4_2	拦控型	2 拦 1 拦截成功控制

表 2 MIP 模型中变迁的含义

Table 2 Definition of the transitions in the MIP

变迁	含义
T1	进入再入段的弹头
T2_1	采取滑翔变轨策略
T3_1	弹头遭遇拦截
T2_2	无进攻策略
T3_2	弹头遭遇拦截
T2_3	采取机动变轨策略
T3_3	弹头遭遇拦截
T4_1	采取 1 拦 1 策略拦截弹头,进入对抗状态
T4_2	采取 2 拦 1 策略拦截弹头,进入对抗状态
T5_1	1 拦 1 策略产生拦截结果
T5_2	2 拦 1 策略产生拦截结果
T6_1	1 拦 1 拦截过程结束,获得毁伤数据
T6_2	2 拦 1 拦截过程结束,获得毁伤数据
T7_1	脱靶量大于阈值,弹头 1 拦 1 拦截失败
T7_2	脱靶量大于阈值,弹头 2 拦 1 拦截失败
T8_1	脱靶量小于阈值,弹头 1 拦 1 拦截成功
T8_2	脱靶量小于阈值,弹头 2 拦 1 拦截成功
T9	助推段拦截成功,弹头进攻失败
T10	拦截失败,弹头进攻成功

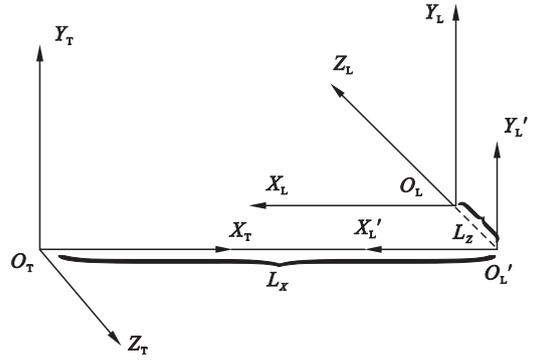


图 3 发射坐标系和拦截坐标系的转换

Fig. 3 Conversion of the launch coordinate system and the intercept coordinate system

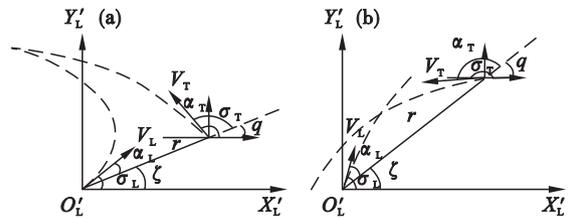


图 4 追击和迎击过程示意图

Fig. 4 Illustration for the pursuit and attack process

(a) — 追击过程; (b) — 迎击过程

拦截弹的运动可以分解为攻击平面内的运动和攻击平面的法向运动. 为了适应侧面逆轨拦截, 采用三维比例导引法, 运动方程如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dr}{dt} &= v_T \cos \alpha_T - v_L \cos \psi_L \cos \alpha_L, \\
 r \frac{d\xi}{dt} &= v_L \cos \psi_L \sin \alpha_L - v_T \sin \alpha_T, \\
 \xi &= \sigma_L + \alpha_L = \sigma_T + \alpha_T, \\
 \frac{d\sigma_L}{dt} &= K \frac{d\xi}{dt}, \\
 \psi_L &= \arctan \frac{Cz}{r}, \\
 \frac{dz}{dt} &= -V_L \sin \psi_L.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

其中: r 为拦截弹与进攻弹的距离在攻击平面内的投影; z 为拦截弹到攻击平面的距离; ξ 为目标线(拦截弹与进攻弹的连线)与基准线(目标线在 $O_L x_L z_L$ 平面内的投影)分别在攻击平面内的投影之间的夹角; v_T, v_L 分别为进攻弹和拦截弹的速度; σ_T, σ_L 分别为进攻弹和拦截弹速度矢量与基准线在攻击平面内的投影之间的夹角; α_T, α_L 分别为进攻弹和拦截弹速度矢量与目标线在攻击平面内的投影之间的夹角; ψ_L 为拦截弹速度方向与攻击平面的夹角; C, K 分别为攻击平面法向和平面内的导引参数。

在 MIP 中, 进攻弹的轨迹及进攻策略释放时

机均在导弹发射之前设计好,拦截弹根据弹道导弹的运动参数实时调节自身运动轨迹.根据进攻弹与拦截弹相对运动方向的不同,可分为追击拦截和迎击拦截两种情况,如图 4 所示.

3 案例仿真

3.1 进攻弹轨迹仿真

以“民兵 III”弹道导弹的参数^[15]作为参考,进行不同进攻策略下来袭导弹轨迹仿真,其主要参数如表 3 所示.

表 3 “民兵 III”导弹参数
Table 3 Missile parameters of “Minuteman III”

参数	级别		
	一级	二级	三级
质量/kg	22 680	7 050	3 650
推进剂质量/kg	20 800	6 246	3 317
比冲/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	236.2	287.88	284.8
推力/t	90.4	27.6	15.7
工作时间/s	61.6	65.2	59.6

通过在图 1 所示的 HSTPN 中使能相应的库所,可选择不同的进攻策略.

1) 当库所 E1, E2 不使能, K1 使能时,来袭导弹不采取进攻策略飞行,轨迹如图 5 中实线所示;

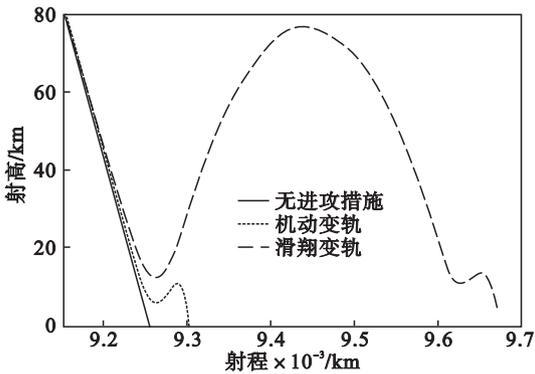


图 5 再入段不同进攻策略的轨迹

Fig. 5 Trajectory of different attacking strategies in the reentry stage

2) 当库所 E2, K1 不使能, E1 使能时,来袭导弹采取机动变轨策略,轨迹如图 5 中虚线所示;

3) 当库所 E1, K1 不使能, E2 使能时,来袭导弹采取滑翔变轨策略,轨迹如图 5 中点划线所示.

3.2 拦截过程仿真

通过在图 1 所示的 HSTPN 中使能相应的库所,可选择不同的拦截方式.

1) 当 K2_1 使能, K2_2 不使能时,采取“1 拦 1”方式拦截来袭导弹;

2) 当 K2_2 使能, K2_1 不使能时,采取“2 拦 1”方式拦截来袭导弹.

“阻塞式”“2 拦 1”拦截过程中,第一枚拦截弹的拦截过程和“1 拦 1”的拦截过程一致,因此本文主要针对“阻塞式”拦截的“2 拦 1”拦截策略进行导弹混杂对策过程仿真.在该过程中,第二枚拦截弹在第一枚拦截弹发射 2 s 后再发射.

迎击过程中双方轨迹变化如图 6a 所示,来袭导弹变轨后双方轨迹变化如图 6b 所示.图 7 为迎击过程中采取机动变轨时追逃双方的弹目距离.

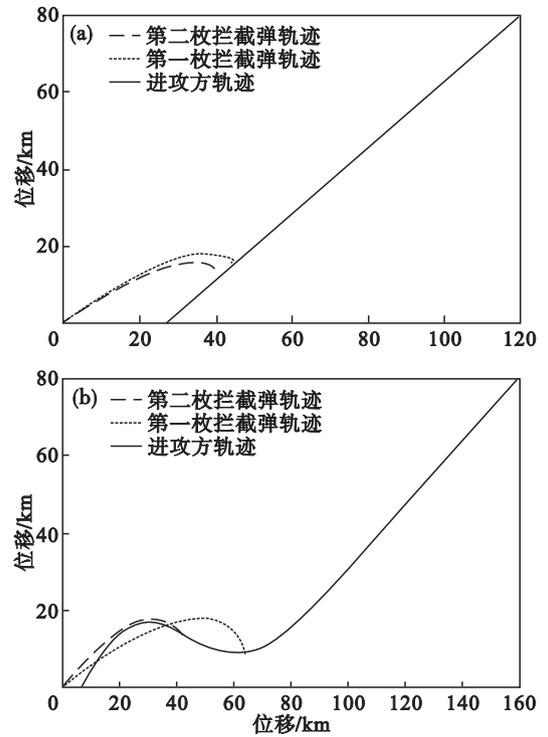


图 6 迎击过程中追逃双方轨迹图

Fig. 6 Trajectories of pursuit and attack in the head-on interception process

(a) — 无变轨; (b) — 机动变轨.

拦截过程结束后,连续库所 T1&L1 或 T1&L2 输出拦截结果.以“2 拦 1”为例:

1) 当拦截失败时,使能库所 K3_2,进而使能库所 Rj 和 Y,输出结果为弹道导弹进攻成功, HSTPN 推演结束;

2) 当拦截成功时,使能库所 K4_2,进而使能库所 Sj 和 LOSER,输出结果为弹道导弹进攻失败, HSTPN 推演结束.

为了更清晰地给出混杂对策描述 MIP 的优势,本文分别采用混杂对策、“1 拦 1”微分对策和“2 拦 1”微分对策对 MIP 进行 1 000 次仿真,结果如表 4 所示.首先引入两个定义:

1) 拦截成功率 ξ ,计算公式为

$$\xi = \frac{\text{拦截成功的次数}}{\text{总的拦截次数}} \times 100\% . \quad (2)$$

2) 费效比 χ ,计算公式为

$$\chi = \frac{\text{耗弹量}}{\text{拦截成功次数}} \times 100\% . \quad (3)$$

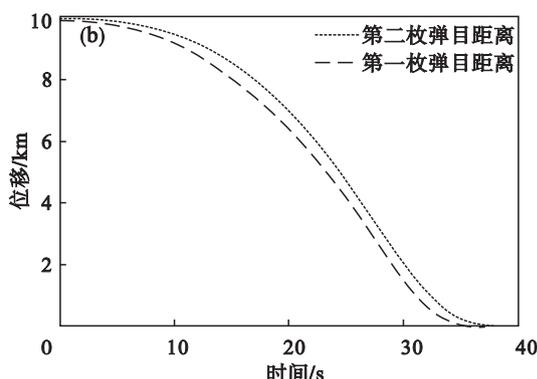
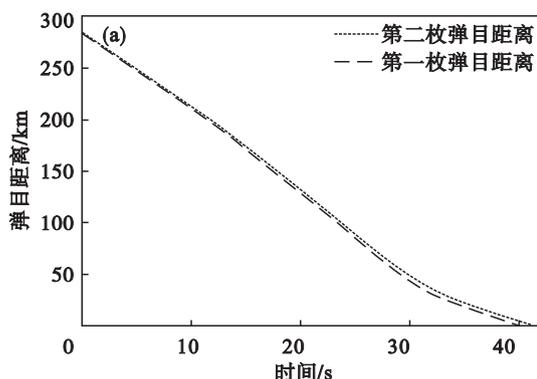


图 7 机动变轨时追逃双方的弹目距离

Fig. 7 Missile-target distance of pursuit and attack process when maneuvering is carried out

(a)—攻击平面; (b)—侧移平面.

从表 4 可得,在不同的进攻策略下,相对于“1 拦 1”微分对策,采用混杂对策的 MIP 可以实现较高的拦截成功次数和拦截成功率;相对于“2 拦 1”微分对策,采用混杂对策的 MIP 可以在拦截

成功次数和拦截成功率相近的条件下,降低耗弹量和费效比.因此,采用混杂对策描述 MIP 在拦截成功率和费效比方面具有综合性优势.

表 4 采用混杂对策、“1 拦 1”微分对策和“2 拦 1”微分对策的 MIP 仿真结果

Table 4 Simulation results of missile interception process utilizing hybrid game, “1 – block – 1” and “2 – block – 1” differential games

轨迹	混杂对策				“1 拦 1”微分对策				“2 拦 1”微分对策			
	拦截成功次数	拦截成功率/%	耗弹量	费效比	拦截成功次数	拦截成功率/%	耗弹量	费效比	拦截成功次数	拦截成功率/%	耗弹量	费效比
无进攻策略	588	58.8	1 716	2.92	513	51.3	1 000	1.95	594	59.4	2 000	3.36
机动	498	49.8	1 793	3.60	378	37.8	1 000	2.65	512	51.2	2 000	3.91
滑翔	500	50.0	1 643	3.28	397	39.7	1 000	2.52	540	54.0	2 000	3.70

注:混杂对策可根据探测结果选择采取“1 拦 1”或“2 拦 1”策略.

4 结 论

本文将 MIP 视为一类混杂系统,针对迎击过程的混杂特性问题,提出采用混杂对策建立一套 MIP 的混杂描述方案.基于 HSTPN 建立了导弹拦截事件对策模型;结合来袭目标和导弹拦截飞行过程的动力学模型,建立 MIP 的微分对策模型;对 MIP 的迎击技术进行“2 拦 1”过程的实例仿真,并验证该模型的合理性.结果证明,采用混杂对策建立的导弹拦截混杂描述方案,既可较好地描述导弹和目标轨迹等连续变量动态系统,也可以描述进攻策略和拦截策略等离散事件动态系统.

参考文献:

- [1] Oyler D W. Contributions to pursuit-evasion game theory [D]. Michigan: University of Michigan, 2016.
- [2] Faruqi F A. Differential game theory application to intelligent missile guidance [R]. Edinburgh: Defence Science and Technology Organisation, 2013.
- [3] Yang T, Geng L N, Duan M K, et al. Research on the evasive strategy of missile based on the theory of differential game [C]//The 34th IEEE Chinese Control Conference. Hangzhou, 2015: 5182 – 5187.
- [4] Battistini S, Shima T. Differential games missile guidance with bearings-only measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2014, 50 (4): 2906 – 2915.
- [5] Turetsky V, Shima T. Hybrid evasion strategy against a missile with guidance law of variable structure [C]// 2016 American Control Conference. Boston, 2016: 3132 – 3137.

- [6] Ramana M V, Kothari M. Pursuit-evasion games of high speed evader [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 85(2) :293 – 306.
- [7] Shinar J, Shima T. A game theoretical interceptor guidance law for ballistic missile defense [C]// Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control. Kobe, 1996 : 2780 – 2785.
- [8] Shinar J, Silberman G. A discrete dynamic game modelling anti-missile defense scenarios [J]. *Dynamics and Control*, 1995, 5(1) :55 – 67.
- [9] Ha J S, Chae H J, Choi H L. A stochastic game-theoretic approach for analysis of multiple cooperative air combat [C]// 2015 American Control Conference. Chicago, 2015 : 3728 – 3733.
- [10] Han C Y, Lunday B J, Robbins M J. A game theoretic model for the optimal location of integrated air defense system missile batteries [J]. *Inform Journal on Computing*, 2016, 28(3) :405 – 416.
- [11] 雷刚, 田海鹏, 鲜勇, 等. 基于博弈论的导弹机动突防策略研究 [J]. *固体火箭技术*, 2014(3) :291 – 294. (Lei Gang, Tian Hai-peng, Xian Yong, et al. Research on the missile maneuver strategy based on game theory [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014(3) :291 – 294.)
- [12] 高强, 徐心和. 证据计数法在落子类机器博弈中的应用 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(8) :1070 – 1074. (Gao Qiang, Xu Xin-he. Application of proof-number search to computer Lazi games [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(8) :1070 – 1074.)
- [13] 徐心和, 石鸿雁. 一个空战实例中的混合对策问题 [C]// 中国控制与决策学术年会论文集. 苏州, 2007 :913 – 916. (Xu Xin-he, Shi Hong-yan. A case study: air fight problem and hybrid game [C]// Proceedings of the 19th Chinese Control and Decision Conference. Suzhou, 2007 :913 – 916.)
- [14] Cao R M, Wang F L, Hao L N, et al. Modeling and simulation of cascade reservoirs flood control system based on hybrid stochastic timed Petri nets [C]// 2016 Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan, 2016 : 997 – 1002.
- [15] 徐明. “民兵 III”号洲际弹道导弹 [J]. *太空探索*, 1994(5) : 12 – 14. (Xu Ming. “Minuteman III” intercontinental ballistic missile [J]. *Space Exploration*, 1994(5) :12 – 14.)