

## 网络化防空反导体系的作战过程建模与仿真\*

朱智,雷永林,朱一凡

(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**网络中心战背景下的网络化防空反导体系的作战过程复杂,目前国内外对其建模与仿真的研究尚处于探索阶段。介绍了网络化防空反导体系的典型作战特点,分别从目标、武器和指控三个角度开发了网络化防空反导体系的作战模型,并设计了接力制导的仿真实验案例,实验结果体现了网络化防空反导体系的作战过程,对防空反导体系的效能仿真具有一定的推动作用。

**关键词:**防空反导;网络化;建模;仿真

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)03-179-06

## Modeling and simulation of operation process for networked air and missile defense systems

ZHU Zhi, LEI Yonglin, ZHU Yifan

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Complexity of NAMD (Networked Air and Missile Defense) systems which is evolved in networked centric warfare makes researches on its modeling and simulation still stay in the initial exploring phase. Many novel characters of systems operation for this domain were introduced, and several models for it were developed from target, weapon and C2 (command and control) perspective respectively, eventually a typical simulation case of relay guidance was designed for models validation. Results analysis not only demonstrates the process of NAMD, but also push forward the effectiveness simulation of NAMD.

**Key words:** air defense and antimissile; networked; modeling; simulation

防空反导技术的发展是与空袭技术的更新密不可分,面对空袭目标的多样化、高速化、隐身化,空袭方式的超视距化,饱和攻击和电子干扰的严峻挑战,以及应对高自我生存和高毁伤能力的要求,将网络中心战引入防空反导体系的研究和形成新型环境下的防空作战样式是必然的选择与发展趋势<sup>[1]</sup>。网络化使得防空作战体系中的武器装备和作战单元达到信息共享和协同作战的目的,与以往的平台中心战或树状体系结构相比,其能够大幅度提高整个体系的反应速度和一体化作战效能<sup>[2-3]</sup>。

由于网络化防空反导体系自身的复杂性,当前国内外对其建模与仿真的研究尚处于探索阶段,或者由于保密而没有公开关键技术的新进展。美军在战区导弹防御(Theater Missile Defense, TMD)、末段高空区域防御(Terminal High-Altitude Area Defense, THAAD)、国家导弹防御(National

Missile Defense, NMD)等大规模防空反导体系的开发中,建立和使用了大量的仿真系统进行分析与论证工作,如EADSIM(Extended Air Defense Simulation),A-STATS(Aegis-Simulation, Test And Training System),ESAMS(Enhanced Surface to Air Missile Simulation),COSMOS(C4ISR, Space and Missile Operation Simulation)等<sup>[4-6]</sup>。

### 1 体系结构与作战特点分析

唐苏妍、朱一凡研究提出<sup>[7-8]</sup>,网络化防空反导体系是由多个(种)探测制导设备、多个拦截干扰武器、多个可变中心的指控节点通过分布式网络连接起来,对空袭目标进行电子对抗并实施拦截的战役战术级、一体化、灵活高效的作战体系,体系结构如图1所示<sup>[9]</sup>。

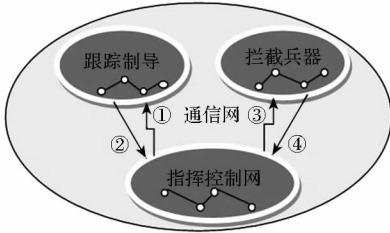
根据隶属单元的临时组合与功能划分可形成探测提示、超视距拦截、远程交战、接力制导和协

\* 收稿日期:2014-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273198)

作者简介:朱智(1989—),男,贵州安顺人,博士研究生,E-mail:zhuzhi0915@126.com;

朱一凡(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yfzhu@nudt.edu.cn

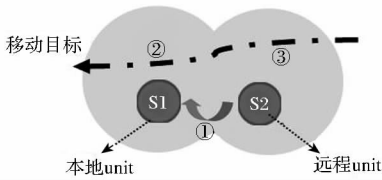


①跟踪制导设备开机指令;②武器跟踪数据、制导指令、自身状态信息;③防空导弹发射指令、发射装订数据(包括发射时刻、发射角度、拦截点经纬度等)④状态信息(包括武器剩余数量、敌我双方毁伤程度)。

图 1 网络化防空反导体系结构

Fig.1 Systems architecture of networked air and missile defense

同交战五种网络化防空作战样式<sup>[10-12]</sup>。探测提示指远程雷达发现威胁目标后,将该提示信息发送给本地火力单元,以使本地单元有充分的时间作发射防空导弹前的准备工作(包括自身状态估计、目标提示信息的融合与解算、形成本地发射车和制导雷达的开机指令等);超视距拦截是在探测提示的基础上,根据探测到的目标提示信息发射防空导弹,然后在威胁目标进入本地雷达探测范围内时利用本地雷达进行制导控制,制导权(计算和提供制导指令)没有移交,仍然是在本地单元;远程交战是在探测提示的基础上,本地单元基于远程信息发射防空导弹,而继续由远程火力单元为本地防空导弹提供制导,制导权在远程火力单元,如图 2 所示<sup>[13]</sup>。



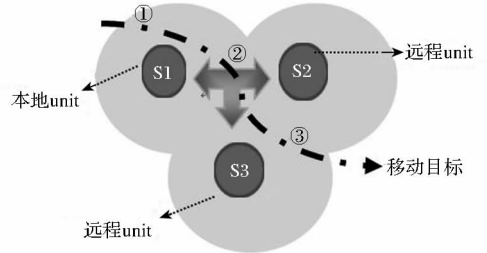
①S2 为 S1 提供目标信息(探测提示);  
②跟踪制导由 S1 提供(超视距拦截);  
③跟踪制导由 S2 提供(远程交战)。

图 2 探测提示、超视距拦截与远程交战

Fig.2 Detect prompt,beyond visual range interception and distance engagement

接力制导是指制导权的交接,即是由其他节点提供所需的制导能力,目的在于隶属节点因故

障等原因无法提供制导时,其他节点可以为本地发射的防空导弹提供精度更高的中末端制导,并且在面对多个目标时,可以发射多枚防空导弹,分散和移交制导权;协同交战与接力制导的区别在于战场环境的不确定性,制导权不是确定性的转移,而是多了制导节点间协同的概念,通过对整个跟踪制导网的全局掌握,动态地为防空导弹提供最方便、最精确的制导,如图 3 所示。



① S1 提供跟踪制导;  
② S1、S2、S3 协同以提供最精确的制导;  
③ S2、S3 协同以提供最精确的制导。

图 3 接力制导与协同交战

Fig.3 Relay Guidance and cooperative engagement

## 2 模型设计

网络化防空反导体系属于典型的复杂系统,建模难度高<sup>[14-15]</sup>,本节从目标分配管理、武器状态管理和指控优选决策三方面基于统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)进行建模。目标的分配管理主要是在探测器发现目标、丢失目标和自身毁伤后的目标状态控制;武器状态管理的建模主要是武器在网络化体系作战下火控制制权的转让;指控优选决策的优化基于指数法,可根据实际需要适当扩充因子或根据各因子的权重适当调整指数系数。

### 2.1 目标分配管理

体系作战模式下,态势信息通过体系内的态势图为体系内各成员所共享,各成员的态势信息汇报经由数据链接口,目标的分配则由编队在态势变化时统一进行分配或调整分配。态势变化的数据链触发事件主要包括:探测器发现目标、探测器丢失目标和毁伤结果汇报。每个事件触发时的目标分配调整分别如图 4、图 5、图 6 所示。

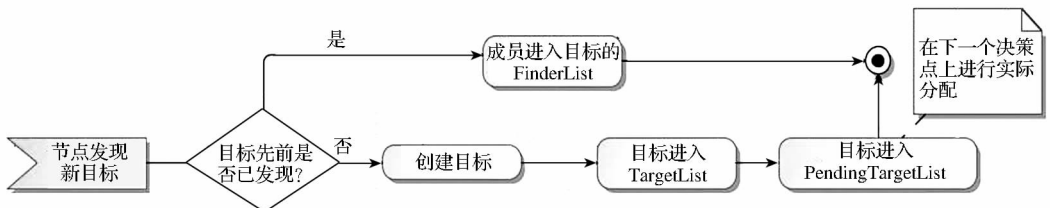


图 4 目标发现

Fig.4 Target discovery

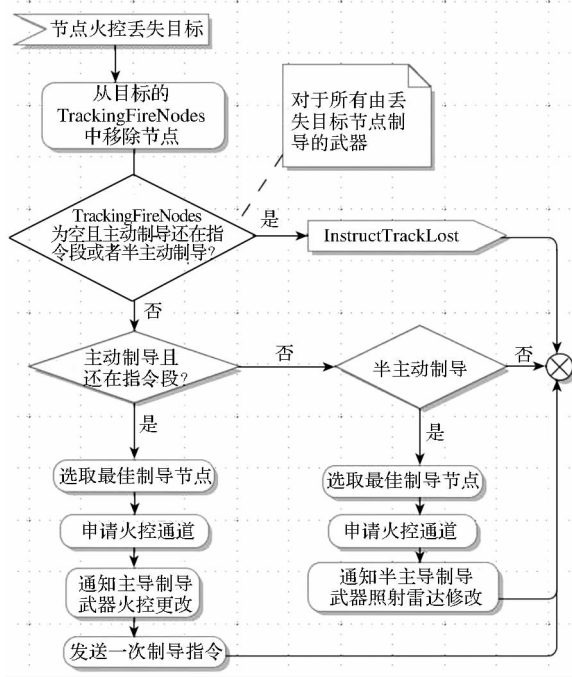


图5 目标丢失

Fig. 5 Target loss

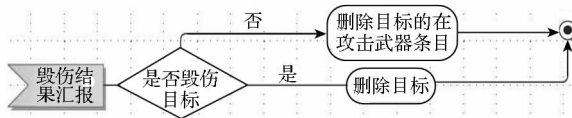


图6 目标摧毁

Fig. 6 Target destruction

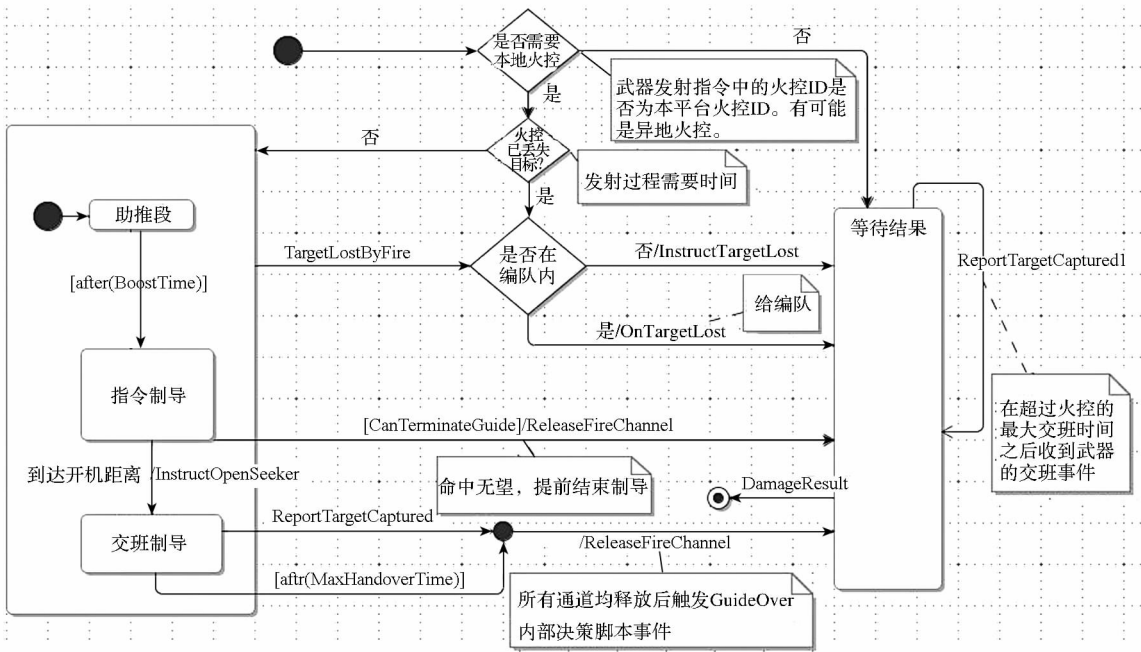


图7 火控武器状态

Fig. 7 State of fire-control weapon

### 2.2 武器状态管理

武器状态管理指武器与火控之间的关系及处理机制,网络化防空反导体系作战下主要涉及武器发射前后火控丢失目标后,判断当前情形是否处于体系作战模式下,决定是否触发事件 TargetLost,从而进行网络化体系作战下的目标分配管理及机制处理,如图 7 所示。

### 2.3 指控优选决策

异地制导中执行火控优选时,不能仅仅只考虑目标与制导节点的距离,还需考虑制导节点本身性能以及其他诸如地理、气候、兵力部署等关系。接力制导执行火控优选时要考虑到导弹飞行距离,因为在指令制导体制下,制导精度通常会随导弹的飞行距离的增加而降低,且抗干扰能力较差。因此,对于中段采取指令制导体制的防空导弹,随着导弹与火控防空阵地距离的增加,当制导精度降低到某一个阈值时,应执行火控优选,选择更适合的制导节点。制导精度不仅与制导节点自身性能(包括探测范围、最大俯仰角、方位视场

角、距离分辨率、角度分辨率等)有关,而且与目标、防空导弹当前时刻的位置以及目标雷达反射截面积(Radar Cross-Section, RCS)有关,可用制导节点的制导质量(quality)来衡量。用指数法评估制导节点分值,其好处是只要其中一个要素分值为 0,那么总得分就为 0,例如在某个火控节点中,若要素中雷达剩余通道为 0( $N_{Left} = 0$ ),不管其他因素的分值有多高,都不应该选择此火控节点承担制导任务。因代码框架庞大,式(1)仅展示  $T$  时刻制导节点 quality 的计算模型。

式中,quality 为火控的评分值, $\sigma$  为雷达探测 RCS(不同的目标与阵地方位相对于不同的雷达探测到的 RCS), $\bar{\sigma}$  为目标最大 RCS 值(定值), $R$  为制导雷达最大作用距离, $R_{Target}$  为平台到目标距离, $R_{Weapon}$  为平台到导弹距离, $N$  为目标最大 RCS 值(定值), $N_{Left}$  为雷达剩余通道数, $\alpha$  为雷达最大方位角, $\beta$  为雷达最大俯仰角, $e_1$  为距离分辨率, $e_2$  为角度分辨率。

$$quality = \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^{u_1} \times \left(\frac{R}{R_{Target}}\right)^{u_2} \times \left(\frac{R}{R_{Weapon}}\right)^{u_3} \times \left(\frac{N_{Left}}{N}\right)^{u_4} \times \left(\frac{\alpha}{360}\right)^{u_5} \times \left(\frac{\beta}{180}\right)^{u_6} \times \left(\frac{1}{e_1}\right)^{u_7} \times \left(\frac{1}{e_2}\right)^{u_8} \quad (1)$$

$u_i$ : 幂指数,  $1 \leq i \leq 8$ , 且  $\sum_{i=1}^8 u_i = 1$

## 3 仿真实验与分析

基于武器效能仿真系统(Weapon Effectiveness Simulation System, WESS)平台<sup>[16]</sup>,通过接力制导的仿真实验体现网络化防空反导体系的作战特点。

### 3.1 接力制导

地空导弹在中段制导过程中,其制导雷达如果发生故障导致其不能正常工作,若此时还有其他雷达对目标进行跟踪,那么在体系统一调配下,此时地空导弹应该由其他成员进行接力制导,消除武器对本地雷达的强隶属性。

### 3.2 实验想定

可设定火控雷达在武器的指令制导段关机,若武器进入中段时刻为  $t_1$ ,进入交班段时刻为  $t_2$ ,设置仿真时钟  $t$  在  $t_1$  与  $t_2$  之间关闭火控雷达。红方为机场,配属一架 A 型战斗机(装配机载雷达 1 个,导弹告警器 1 个、反辐射导弹两枚);蓝方是由三个防空阵地单元(1、2、3)组成的防空阵地混编群,各阵地装配爱国者雷达 1 架,地空导弹各 8 枚,如图 8 所示。

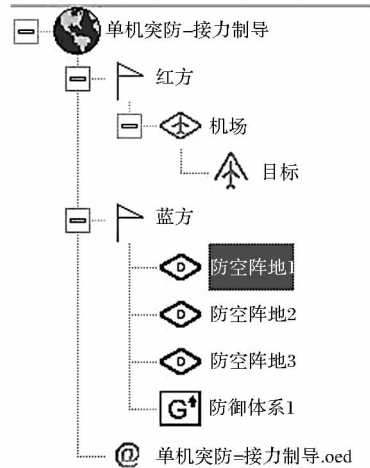


图 8 实验想定模型  
Fig. 8 Scenario tree

### 3.3 型号数据准备

对抗双方模型包括机场、固定翼飞机、空面导弹、机载火控雷达、导弹告警器、防空阵地、地基雷达和地空导弹,各模型型号准备如表 1 所示,表中包括各模型的坐标位置,及飞机航路点、高程和速度。

表1 红蓝双方型号数据

Tab.1 Prototype data of both sides

作战方	实体类型	航路点(坐标—高程—速度)		
	机场	(121.48, 25.05)		
红方	固定翼飞机	(121.48, 25.05)	5000	600
		(116.84, 26.13)	6000	600
	防空阵地1	(119.31, 26.07)		
蓝方	防空阵地2	(119.31, 26.07)		
	防空阵地3	(119.31, 26.07)		

### 3.4 结果与分析

防空阵地1的火控雷达地基雷达A在t=412时刻建立“地基雷达A—地空导弹1—目标”的火控关系且由防空阵地1发射拦截武器地空导弹,如图9所示;地空导弹在t=445时刻助推段结束,进入中段;在t=520时刻地基雷达A关机;在t=535时刻建立新“地基雷达C—地空导弹—目标”的火控关系,如图10所示。图11和图12是仿真的二维表现图,可看出制导权已从地基雷达A移交给地基雷达C。

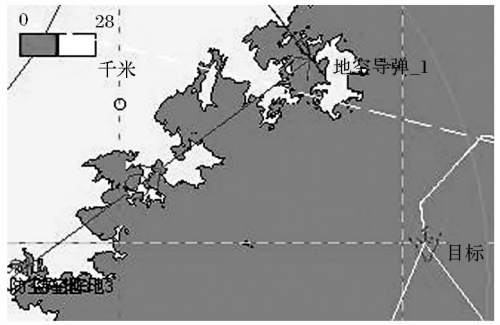


图12 防空阵地3火控关系的二维表现  
Fig.12 Dimensional display of fire control relationships for air defense base 3

```
411.000: [脚本] 分配目标:目标
411.000: [脚本] 空袭目标(飞机), 启动防空程序
412.000: 建立火控关系: [地基雷达A_1]+[地空导弹_1]->[目标]
```

图9 防空阵地1模型消息

Fig.9 Model message of air defense base 1

```
444.000: [脚本] 发现目标:目标
444.000: [脚本] 空袭目标(飞机), 启动防空程序
535.000: 建立火控关系: [地基雷达C_1]+[地空导弹_1]->[目标]
```

图10 防空阵地3模型消息

Fig.10 Model message of air defense base 3

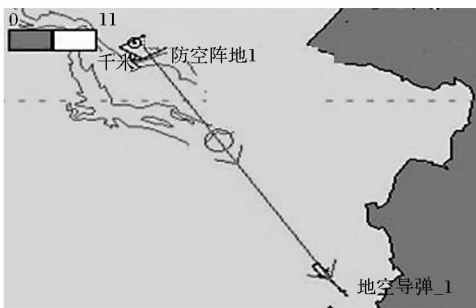


图11 防空阵地1火控关系的二维表现  
Fig.11 Dimensional display of fire control relationships for air defense base 1

### 4 结论

网络化防空反导体系的作战特点较之前的

非网络化应用而言,是根据战场态势将分布在广域战场中的各种目标、指控中心、探测装置、武器等资源的配置关系实时调整,以实现战场信息的透明和作战资源的灵活运用,增强战场态势感知能力,加快指挥决策速度,取得非对称信息优势,将信息优势转化为决策优势,从而转化为作战优势。文章对网络化防空反导体系作战的特点进行描述,主要以简洁的图示方式集中体现网络化防空反导体系的武器资源制导权的转让、指控中心的协同、交战方式等作战优势,其后主要从目标管理、武器状态管理、指控中心决策三个方面对网络化防空反导体系进行建模,最后通过设计接力制导的实验案例展示网络化防空反导体系作战的过程,实现了初始概念到建模、建模再到实验分析的研究方法,对网络化防空反导体系的进一步研究具有一定的启示意义。

### 参考文献 (References)

- [1] DoD. Network centric warfare, DoD report to congress [R]. Washington D. C. : DoD, 2001.
- [2] Baresi L, Guinea S. A - 3: an architectural style for coordination distributed components [C]//Proceedings of IEEE/IFIP Conference on Software Architecture, 2011: 161 - 170.
- [3] Baresi L, Guinea S. A - 3: self-adaptation capabilities through groups and coordination [C]// Proceedings of India Software Engineering Conference, 2011:11 - 20.
- [4] Alberts D S, Garstka J J, Stein F P. Networked centric warfare: development and leveraging information superiority [M]. USA: CCRP Publication Series, 2000.
- [5] Missile Defense Agency, USA. Information request for disruptive technology options and approaches for the future ballistic missile system (BMDs) command control, battle management and communication (C2BMC) element [EB/OL]. [2010 - 04 - 19]. <https://www.fbo.gov/spg/ODA/MDA/MDA-DACV/HQ0147-10-R-EC2BMC/listing.html>.
- [6] Hopkins J. The cooperative engagement capability [J]. APL Technical Digest, 1995, 16 (4): 377 - 396
- [7] 唐苏妍,朱一凡. 网络化防空反导体系结构及作战流程研

- 究[C]//全国博士生学术论坛(军事学),南京陆军指挥学院,2009.
- TANG Suyan, ZHU Yifan. Research on flow of networked air & missile defense systems warfare [C]// National Learning Forum of PHD, College of Army, Nanjing, 2009. (in Chinese)
- [8] 罗爱民,修胜龙,罗雪山,等. 防空导弹网络化作战 C<sup>4</sup>ISR 系统体系结构研究[J]. 国防科技大学学报,2004,26(6): 86-90.
- LUOaimin, XIU Shengxue, LUO Xueshan, et al. Networked operation of air defense missile [J]. Journal of National University of Defense Technology,2004,26(6):86-90. (in Chinese)
- [9] 朱智,雷永林,朱宁,等. 面向网络化防空反导体系的可组合建模框架[J]. 国防科技大学学报,2014,36(5): 186-190.
- ZHU Zhi, LEI Yonglin, ZHU Ning, et al. Composable modeling frameworks oriented networked air & missile defense systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014,36(5):186-190. (in Chinese)
- [10] Sapaty P S. Distributed air & missile defense with spatial grasp technology [J]. Intelligent Control and Automation, 2012,3(2):117-131.
- [11] Sapaty P S. Distributed technology for global control [J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, 2009,37: 3-24.
- [12] Sapaty P S, Morozov A, Finkelstein R. A new concept of flexible organization for distributed robotized systems [J]. Artif Life Robotics, 2008,12(1/2):88-96.
- [13] 唐苏妍. 网络化防空反导体系动态拦截联盟形成机制与方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- TANG Suyan. Research on dynamic interception coalition formation mechanism and method in networked air defense missile systems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [14] 雷永林,李群,杨峰,等. 武器装备效能仿真的可组合建模框架研究[J]. 系统工程理论与实践, 2013,33(11): 2954-2966.
- LEI Yonglin, LI Qun, YANG Feng, et al. A composable modeling framework for weapon systems effectiveness simulation [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013,33(11):2954-2966. (in Chinese)
- [15] Lei Y L, Wang W P, Li Q, et al. A transformation model from DEVS to SMP2 based on MDA [J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2009,17(10):1690-1709.
- [16] 王维平,李群,朱一凡,等. 柔性仿真原理与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2003.
- WANG Weiping, LI Qun, ZHU Yifan, et al. Principles and practice of flexible simulation [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)