

基于统计分析的作战行动效能评估方法

程 恺^{1*}, 张 睿¹, 张宏军¹, 车军辉²

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 南京陆军指挥学院, 南京 210045)

(* 通信作者电子邮箱 chengkai911@msn.com)

摘 要: 由于作战过程中不确定因素多, 作战行动效果数据表现出显著的随机性。为了探索效果数据背后隐藏的作战规律, 基于统计分析的方法研究作战行动效能的评估问题。分析了作战行动及其效能的基本概念, 针对增强最简半自治适应性作战神经网络工具箱(EINSTEIN)产生的仿真数据采用单次、单组以及多组实验分析的手段, 研究进攻行动效果数据的统计特征, 发现对于具有作战优势的一方, 相比通过增加作战人数而言, 提高火力半径能够取得更好的作战效果。在此基础上, 提出一种作战行动效能的评估方法, 并结合仿真数据进行了验证, 从而为基于实际训练效果数据的效能评估提供可行的解决方案。

关键词: 作战行动; 效果数据; EINSTEIN 工具箱; 统计; 效能评估

中图分类号: TP391.97 **文献标志码:** A

Effectiveness evaluation method based on statistical analysis of operations

CHENG Kai^{1*}, ZHANG Rui¹, ZHANG Hong-jun¹, CHE Jun-hui²

(1. Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. Nanjing Army Command College, Nanjing Jiangsu 210045, China)

Abstract: The effect data of actions show a significant randomness because of lots of uncertain elements in the course of action. In order to explore the rules of warfare hidden behind the data, the effectiveness evaluation was studied based on statistical analysis method. The basic concept of action and its effectiveness were analyzed. With the simulation data produced by enhanced irreducible semi-autonomous adaptive combat neural simulation toolkit (EINSTEIN), a single, a group and multi group experimental methods were used to study the statistical characteristics of offensive actions and find out that to a party who has a combat advantage, compared with increased number of personnel, the increased radius of firepower can achieve better operational results. On this basis, an evaluation method of action effectiveness was proposed and validated with simulation data. Therefore, a feasible resolution is provided to evaluate the action effectiveness based on actual combat data.

Key words: action; effect data; EINSTEIN tool; statistics; effectiveness evaluation

0 引言

普鲁士将军 Carl von Clausewitz 曾经说过“战争是不确定的王国, 战争所依据的四分之三因素或多或少地被不确定性因素的迷雾包围着”^[1]。为了拨开战争不确定性这层迷雾, 军事专家试图通过效能评估探寻战争中存在的规律, 取得了许多有价值的研究成果^[2-4]。效能评估问题一直是军事运筹领域研究的热点^[5-6], 作战行动是作战过程的核心元素, 因此需要首先对作战行动的效能进行评估。为了降低评估中的随机性, 文献[7]用不确定自信息量度量完成任务的程度, 难点在于隶属函数的确定; 文献[8]引入理想观察者分析法解决不确定决策效能评估问题, 但是方法基于静态目标, 缺乏对实际作战中动态目标的讨论; 文献[9]对一种概率意义下的 Lanchester 方程进行了统计分析; 文献[10]通过统计检验的方法, 实现了自行火炮行驶平顺性的统计评估。由此可知统计分析的方法在处理随机性问题上具有诸多优势^[11-12], 但是目前在作战行动的效能评估中应用较少, 而作战行动数据往往数量巨大, 亟需一种可行的方法分析这些数据, 从而发现作战过程中存在的统计性规律。

由于影响部队作战不确定因素多, 作战行动在不同条件下产生的效果数据具有随机性大的特点, 故本文针对作战行动效果数据采用统计分析的方法, 研究它们的整体结构特征以及数据之间的量化关系, 进而根据统计特征推断作战行动间存在的一般规律, 最终达到评估作战行动效能的目的。

1 基本概念

作战行动是为遂行作战任务而采取的持续性活动。目前我军在作战模拟领域将其定义为作战单元在特定战场环境下的不可分或不必要在分的基本战斗行为。相应的, 美军在任务空间概念模型中^[13]采用 EATI 模板的方法抽象出作战过程中最小的原子行为——动作。

虽然这两种定义在表述上有所不同, 但从本质来说它们是一致的, 都突出了不可再分、原子性的特点。为了方便讨论, 本文将这种基本的行为统一称为作战行动。在实际的军事问题中, 作战行动的不可再分性通常是相对的, 取决于所研究问题的层次。

作战行动的效能是衡量行动效果与任务需求的重合度, 通过一定的公式或算法来量化这个程度的大小, 即效能值是

收稿日期: 2011-10-09; 修回日期: 2011-12-02。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70971137)。

作者简介: 程恺(1983-), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要研究方向: 作战效能评估、作战模拟; 张睿(1977-), 男, 山东威海人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 军事建模与仿真; 张宏军(1963-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要研究方向: 作战模拟与决策分析; 车军辉(1979-), 男, 安徽六安人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 军事情报。

效果和需求的函数^[14]。可见,作战行动的效能最终依赖于行动效果中的可观测的量、表达需求的参数以及这两者进行比较的方法,而作战行动效果数据就是这些可观测的量,例如机动的速度,使敌遭受的人员伤亡率等。

2 作战行动效果数据统计分析

EINSTEIN 系统^[15]是由美国海军陆战队发展司令部在战斗模拟系统(Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat, ISAAC)的基础上,研制的一种作战仿真平台。系统基于 Agent 技术构建,为研究陆军作战中不确定性、非线性等战争复杂性问题提供了新的工具。因此本文基于 EINSTEIN 仿真数据,分别从单次仿真实验分析、单组仿真实验分析、多组仿真实验分析三个角度,探讨多种兵力和武器配比方案下的仿真结果,以期发现不同条件下作战过程中存在的统计性规律,为作战行动的效能评估打下良好基础。

2.1 单次仿真实验分析

单次仿真实验分析是指针对一次仿真运行后采集的数据进行分析,主要包括仿真过程的数据展示以及仿真结果的数据统计。在每获取一次模拟样本之后,进行敌我双方的作战结果统计分析,以支持下一步的评估需要。

由于作战行动的种类繁多,为了便于问题的分析,主要讨论分队级作战中进攻这一典型作战行动。作战想定:红方向蓝方发起进攻,占领蓝方阵地并将其消灭;蓝方进行阵地防御,击退红方进攻。作战模型的初始设置:战场地图大小 100×100 ,仿真时长 200 个时间单位,红方 100 个 Agent,蓝方 50 个 Agent,每个 Agent 代表一个作战单兵,根据 EINSTEIN 系统的输入条件,确定红蓝双方的范围属性如表 1 所示。

表 1 范围属性表

属方	侦察距离	火力半径	战斗欲望	机动速度
红方(健康)	16	16	8	2
红方(受伤)	8	8	4	1
蓝方(健康)	10	10	4	2
蓝方(受伤)	5	5	2	1

图 1 分别表示在仿真时刻为 0, 100, 150, 200 时的战场情况。

从仿真的过程可以看出,红方以压倒性的优势消灭了蓝方所有人员,并占领了蓝方的阵地。仿真的结果是红蓝双方

人员的战损情况,具体为红方剩余健康人数 72,受伤人数 20,蓝方在仿真时刻 166 时已全部阵亡。

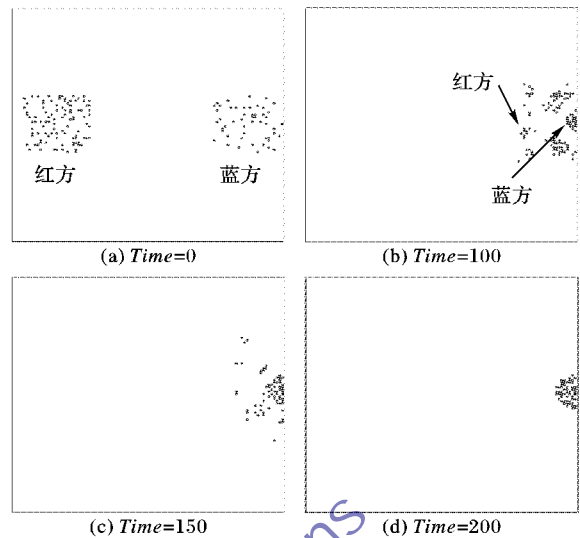


图 1 进攻作战仿真过程示意图

2.2 单组仿真实验分析

单组仿真实验分析是指在仿真输入参数固定的条件下,针对多次仿真实验结果数据进行分析。当作战行动是由多个随机模型组合而成时,由此行动产生的实验结果就表现为一系列的随机数据。对这些随机数据进行统计分析主要包括样本的数字特征、区间估计以及假设检验三个方面的内容。

模型参数与表 1 中的设置相同,共进行 100 次红方进攻战斗的模拟,仿真结果的基本统计分析如表 2 所示。

从表 2 可以看出,样本均值与样本中位数比较接近,说明样本中“离群点”较少,在同一输入条件下未出现极端情况,仿真结果较为可靠。红方健康人数、受伤人数的样本方差远大于蓝方相应的值,表明红方的战损情况波动较大,对最终作战效果的影响更明显。其原因在于进攻这一作战行动的效果主要体现在敌、我双方的战损情况。表 1 中红方的侦察距离、火力半径、战斗欲望较蓝方优势明显,蓝方损失惨重这一结果是必然的,在数据上表现为蓝方较小的样本方差。红方虽然能够取得胜利,但是其样本方差较大,说明作战中还是存在一定的不确定性。由此从数据统计分析的角度印证了一条作战的基本原则:对于具有进攻优势的一方,在作战中应提高己方的生存能力,以取得更好的作战效果。

表 2 基本统计分析结果

描述统计量	样本最小值	样本最大值	样本中位数	样本均值	样本方差	置信区间(95%)	
						μ	σ
红方健康人数	69	93	81	81.01	23.424 1	[80.049 7, 81.970 3]	[4.249 4, 5.622 3]
红方受伤人数	7	30	18	17.59	21.173 6	[16.677 0, 18.503 0]	[4.040 1, 5.345 4]
蓝方健康人数	0	9	3	3.29	4.470 6	[2.870 5, 3.709 5]	[1.856 4, 2.456 2]
蓝方受伤人数	1	13	5	4.48	6.353 1	[3.979 9, 4.980 1]	[2.213 1, 2.928 1]

假设各统计结果服从正态分布,在置信水平 95% 的条件下,对正态分布的模型参数均值 μ 和均方差 σ 进行了区间估计。虽然从置信区间可以看出正态性假设较为理想,但仍需进一步对其进行假设检验。

Q-Q 图是一种评估正态性假定的直观方法,它展示的是样本分位数与观测值之间的关系,当各点离一条直线很近时,正态性假定是保持的,否则,正态性就较可疑。红方受伤人数统计结果的 Q-Q 图检验如图 2 所示。

从图 2 数据的分布情况判断,红方受伤人数总体上服从正态分布,同理可得红方健康人数及蓝方相应战损数据也服从正态分布,可知假设条件与检验结果是一致的。由于每次运行是相互独立的,并且模型的初始参数不变,那么可认为每次仿真结果是独立同分布的随机变量,相互之间的偏差不会很大,因此假设仿真结果服从正态分布是合理的。

2.3 多组仿真实验分析

多组仿真实验分析是指在仿真输入参数变化的条件下,

针对多组仿真实验结果数据进行分析。通过改变运行的初始条件,研究不同作战条件对作战结果产生的影响,从而支持实验结果的预测以及作战行动效能的评估。

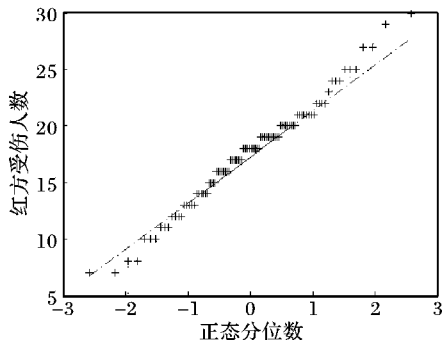


图2 红方受伤人数的Q-Q图检验

以表1中的参数设置为基础,蓝方输入参数保持不变,分别改变红方的火力半径以及总体人数,各进行50次仿真模拟。统计结果如图3、图4所示。

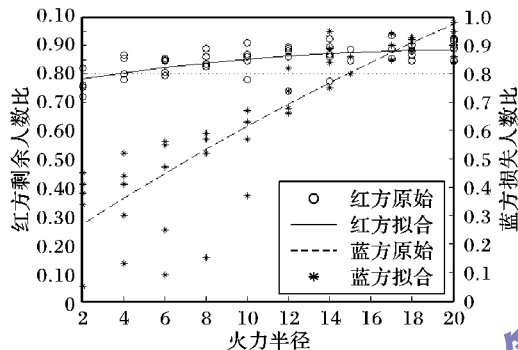


图3 不同火力半径下红蓝战损

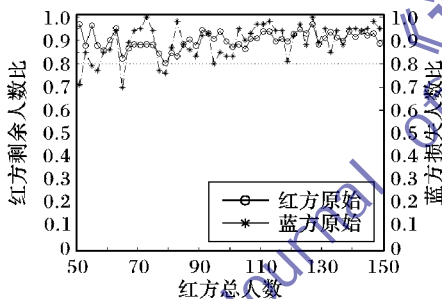


图4 不同人数下红蓝战损

根据仿真的输出结果,设红方健康人数 x_1 ,红方受伤人数 x_2 ,蓝方健康人数 x_3 ,蓝方受伤人数为 x_4 ,红蓝双方战前总人数分别为 N_r , N_b ,则红方剩余人数比 η_r 通过式(1)计算:

$$\eta_r = \frac{x_1 + \alpha \times x_2}{N_r} \quad (1)$$

蓝方损失人数比 η_b 通过式(2)计算:

$$\eta_b = 1 - \frac{x_3 + \beta \times x_4}{N_b} \quad (2)$$

其中 $\alpha, \beta \in (0, 1)$ 分别表示红蓝双方受伤人员的健康系数,由表1可知双方受伤人员范围属性值均是健康时的一半,所以 $\alpha = \beta = 1/2$ 。

规定当作战的一方损失人数比达到80%时,即宣告此方作战失败。图3表示的是在红方不同火力半径条件下, η_r (对应左纵轴)与 η_b (对应右纵轴)的变化关系。对于红方而言,作战的目标是在保证本方战损尽可能小的同时最大可能地打击对手,即在图中反映为 η_r 和 η_b 越大越好。通过对结果数据的回归分析,可以看到随着红方火力半径的增大, η_r 增

加缓慢,而 η_b 增加迅速,表明火力半径对作战效果的影响明显,且主要体现在对蓝方的打击效果上。进一步分析,可以发现当红方的火力半径达到15时,蓝方损失已达到80%,即已失去作战能力,虽然随着火力半径的增大,蓝方的损失会继续增加,但是红方存活率已基本不再增加,更高的蓝方死伤率对最终作战结果影响不大。实际作战时人力物力资源通常是有限的,需要合理地分配使用各种武器装备,既保证对敌的打击作战效果,又不能盲目地使用高杀伤性武器,造成资源的浪费。因此,在上述仿真条件下,火力半径的取值范围在15~18是较为合理的。

同样的,图4表示的是在红方不同总体作战人数的条件下, η_r 与 η_b 的变化关系。从图中可以看出, η_r 和 η_b 基本重合,在一个水平线上,红方的生存率和蓝方的死伤率都没有明显的增加。进一步分析,发现随着红方总体作战人数的增加,红方生存率没有明显的提高,然而由于人员基数的增大,红方死伤人员的绝对数量实质是在增加的,这一结果显然与通过增加总体作战人数来提高对敌打击效果的初衷是不相符的。究其原因在于仿真的初始条件上,红方在火力半径和作战欲望上对蓝军具有明显的优势,在此前提下,作战人员数量这一因素对作战的效果没有太大影响。可以看到,无论红方作战人员数量的多少,蓝方的死伤率基本都在80%以上,即红方已达到了作战的目的。因此对于在武器装备上具有优势的一方,不能想当然地认为增加作战人员的数量就一定能够取得较好的作战效果,应当注意适当地配置人员,在完成对敌打击任务的条件下尽可能减少己方损失,以取得理想的作战效果。

以上在红方较蓝方总体上占有优势的条件下,讨论了火力半径与兵力规模对作战效果的影响程度。按照这一研究思路,可以在红方与蓝方势均力敌或者红方较蓝方总体上处于劣势的条件下,探讨各种因素对作战效果的影响,从中发现一些有价值的作战规律,继而为指挥部门提供有力的决策依据。

3 作战行动效能评估

对作战行动效果数据统计的目的在于评估其效能,考虑到作战行动不可再分以及效果数据随机性的特点,其评估过程如图5所示。

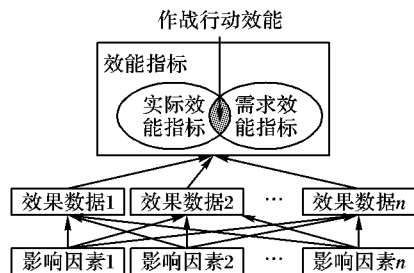


图5 作战行动效能评估示意图

作战行动是在一定战场环境下发生的,受到像地形、兵力、武器装备等主客观因素的制约,而作战行动的效果数据就是在这些影响下的具体表现。作战行动的效果数据通常是一个多维向量,可以表示为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,向量的每一维都从一个侧面反映了行动的执行效果。鉴于作战行动原子性的特点,需要将这个多维向量映射到一个能够综合反映行动结果效能指标 I ,即 $I = G(X)$ 。在对效果数据统计分析的基础上,得到效能指标的统计特征,结合作战行动的目标定义需求效能指标 I_r 。通过比较实际效能指标 I_p 与需求效能指标的重合程度,计算作战行动的效能值 E 。

根据重合度比较方式的不同,效能值 E 的计算可分为至多型、至少型、区间型三种情况。

1) 至多型。

给定一个指标需求值 I_r , 要求指标的实际值不能超过需求值 I_r , 由统计可得实际指标的概率密度函数为 $f(I)$, 如图 6(a) 所示, 阴影部分的面积即是指标满足需求的效能值 E , 可用式(3)计算。

$$E = F(I_r) = \int_{-\infty}^{I_r} f(t) dt \quad (3)$$

2) 至少型。

给定一个指标需求值 I_r , 要求指标的实际值至少要大于需求值 I_r , 如图 6(b) 所示, 阴影部分的面积即是指标满足需求的效能值 E , 可用式(4)计算。

$$E = 1 - F(I_r) = 1 - \int_{-\infty}^{I_r} f(t) dt \quad (4)$$

3) 区间型。

给定一个指标需求区间 $[I_{ra}, I_{rb}]$, 要求指标的实际值在区间 $[I_{ra}, I_{rb}]$ 上, 如图 6(c) 所示, 阴影部分的面积即是指标满足需求的效能值 E , 可用式(5)计算。

$$E = F(I_{rb}) - F(I_{ra}) = \int_{I_{ra}}^{I_{rb}} f(t) dt \quad (5)$$

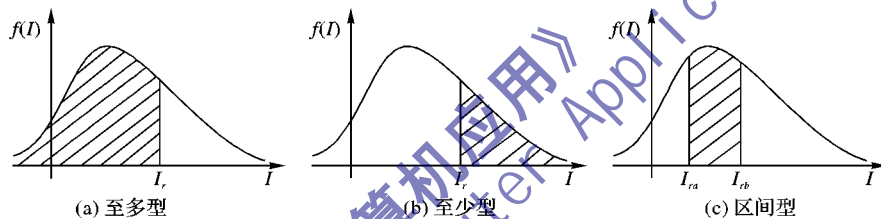


图6 效能值 E 的计算情况

以文中红方对蓝方的进攻行动为例, 说明作战行动效能评估的基本过程。影响因素为仿真的四个输入参数: 侦察距离、火力半径、战斗欲望、机动速度; 效果数据为仿真的输出: 红方健康人数 x_1 , 红方受伤人数 x_2 , 蓝方健康人数 x_3 , 蓝方受伤人数 x_4 , 则效能数据向量 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^4$ 。从红、蓝两个方面反映了进攻的作战效果, 据此将战损交换比定义为效能指标 I , 表示红方伤亡人数与蓝方伤亡人数的比值, 具体表示为:

$$I = G(\mathbf{X}) = \frac{N_r - x_1 - \alpha \times x_2}{N_b - x_3 - \beta \times x_4} \quad (6)$$

其中: $I \in [0, +\infty)$, N_r 、 N_b 分别表示战前红、蓝方总人数, 在本案例中 $N_r = 100$, $N_b = 50$, $\alpha = \beta = \frac{1}{2}$, 其中健康系数 α 、 β 可根据红、蓝双方人员具体范围属性值设定。采用 2.2 节中单组 100 次仿真结果数据, 通过统计分析确定实际效能指标 I 满足均值 0.2311, 方差 0.0655 的正态分布, 即 $f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.2559} e^{-\frac{(I-0.2311)^2}{2 \times 0.2559^2}}$ 。根据行动的目标需求确定 $I_r = 0.15$, 且要求至少大于 I_r , 可知为至少型, 从而利用式(4)计算得效能值 $E = 0.6255$, 则可认为红方完成此次进攻作战行动成功的概率是 0.6255。

4 结语

基于 EINSTein 系统产生的仿真数据, 采用统计分析的方法对进攻这一典型的作战行动进行了深入研究。从多次仿真实验数据中发现了作战过程中存在的统计性规律, 在分析效能指标概率分布的基础上, 提出作战行动效能的评估方法。虽然采用仿真数据, 但是数据统计分析的方法以及作战行动效能评估的思路, 对实际作战训练效果数据的研究具有较高参考价值。

准确的评估离不开可靠的数据, 因此应注重对实际作战行动数据的采集, 在本文基于仿真数据的基础上, 结合部队演习实况数据研究作战行动效能的评估问题。另外, 在多组仿真实验分析中讨论了单因素影响下的作战规律, 并未对双因素及多因素的影响进行分析; 在相同影响因素下评估了作战行动的效能, 没有对不同影响因素下的效能评估进行探讨, 这些都是进一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 胡晓峰, 司光亚, 吴琳, 等. 战争模拟引论[M]. 北京: 国防大学出版社, 2004.
- [2] McCORMICK S. A primer on developing measures of effectiveness[J]. Military Review, 2010, 90(4): 60-66.
- [3] 彭方明, 邢清华, 刘睿渊. 改进证据推理的联合防空作战效能评估模型[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2265-2268.
- [4] 穆中林, 周中良, 于雷, 等. 编队对地攻击作战效能评估的系统动力学方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 565-570.
- [5] 江敬灼. 论作战实验法[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(3):

- [6] 程恺, 车先明, 张宏军, 等. 基于支持向量机的部队作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1055-1058.
- [7] 彭征明, 李云芝, 罗小明. 用不确定性度量作战效能的评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(3): 65-70.
- [8] 邓鹏华, 毕义明, 刘继方. 一种不确定作战决策效能评估模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7381-7385.
- [9] 许世蒙, 谢古今, 潘高田. 一种作战模型数值模拟的基本探讨[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(7): 106-111.
- [10] 狄长春, 杜中华, 吴大林. 基于座椅系统虚拟样机的自行火炮行驶平顺性统计评估[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 442-445.
- [11] 邓桂龙, 刘智慧, 贾志东. 作战仿真实验数据关联规则挖掘研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2008, 22(4): 46-50.
- [12] LI MING. New methods for statistical modeling and analysis of non-destructive evaluation data[D]. Ames, Iowa, USA: Iowa State University, 2010.
- [13] WANG JIAN, WANG HONGWEI. A CMMS-based formal conceptual modeling approach for team simulation and training[C]// ISNN'09: Proceedings of the 6th International Symposium on Neural Networks on Advances in Neural Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 946-955.
- [14] 胡剑文, 张维明, 胡晓峰, 等. 一种基于复杂系统观的效能分析新方法: 单调指标空间分析方法[J]. 中国科学: E 辑(信息科学), 2005, 35(4): 352-367.
- [15] ILACHINSKI A. Enhanced ISAAC neural simulation toolkit (EINSTein): An artificial-life laboratory for exploring self-organized emergence in land combat, beta-test user's guide[EB/OL]. [2011-02-24]. <http://www.cna.org/isaac/einstein.htm>.