

12-13-2019

Evaluation Method of Simulation Results Based on Principal Component Analysis

Rusheng Ju

College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

Zimin Cai

College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

Yang Mei

College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

Wang Song

College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Evaluation Method of Simulation Results Based on Principal Component Analysis

Abstract

Abstract: A large amount of result data are produced by complex system simulation. These data types are diverse and complex. Usually they cannot be used directly. The inner pattern can only be found by effective evaluation. *Based on the characteristics of complex combat simulation results, this paper utilizes the Principal Component Analysis method to reduce the dimension of data analysis and explore the relationship between the system input data and output data. The key influence factors of the measure of force effectiveness is found.* The application verification is done by typical examples. The selected principle factors are explored in depth to verify the effectiveness of the method. The strategy can be referred by other peer.

Keywords

complex system simulation, evaluation, principle component analysis, force effectiveness

Recommended Citation

Ju Rusheng, Cai Zimin, Yang Mei, Wang Song. Evaluation Method of Simulation Results Based on Principal Component Analysis[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2678-2684.

基于主成分分析的仿真结果评估方法

鞠儒生, 蔡子民, 杨妹, 王松

(国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410072)

摘要: 复杂系统仿真往往会产生海量的结果数据, 这些数据类型多样、关联复杂, 用户通常不能直接使用, 必须经过有效评估分析, 才能寻找到仿真结果数据背后隐藏的规律。根据复杂仿真系统结果数据的特点, 利用主成分分析方法降低数据分析的维度, 探索系统输入输出数据之间的关联, 寻找影响作战效能的关键要素, 通过案例进行应用验证, 对提炼出的各个主成分因素进行深入探索, 说明了该方法的有效性, 分析策略可供广大同行研究参考。

关键词: 复杂系统仿真; 评估; 主成分分析; 作战效能

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 12-2678-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0126

Evaluation Method of Simulation Results Based on Principal Component Analysis

Ju Rusheng, Cai Zimin, Yang Mei, Wang Song

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: A large amount of result data are produced by complex system simulation. These data types are diverse and complex. Usually they cannot be used directly. The inner pattern can only be found by effective evaluation. Based on the characteristics of complex combat simulation results, this paper utilizes the Principal Component Analysis method to reduce the dimension of data analysis and explore the relationship between the system input data and output data. The key influence factors of the measure of force effectiveness is found. The application verification is done by typical examples. The selected principle factors are explored in depth to verify the effectiveness of the method. The strategy can be referred by other peer.

Keywords: complex system simulation; evaluation; principle component analysis; force effectiveness

引言

随着高性能计算, 大数据处理等信息技术的发展, 复杂仿真系统规模逐渐增大, 仿真实体数量迅速增长, 实体之间交互日益复杂, 仿真结果数据呈现出高维特征, 因此对仿真结果进行评估亟需降低数据分析维度, 最大程度还原出仿真输入输出数据

之间的非线性关系。而目前快速发展的人工智能技术, 例如神经网络、深度学习等在处理高维数据内在非线性特征方面具有良好的适应性。2006 年, Hinton 等在《Science》上撰文阐述基于神经网络降低数据维度的方法, 提出通过逐层训练来初始化网络参数的方法, 有效解决了神经网络陷入局部最优问题, 其提出的“深度学习”概念促进了神经网络新发展^[1]。王华等运用规则驱动的仿真原理、层次分析法等评估方法, 对炮兵维修分队保障行动进行仿真评估并取得了较好的效果^[2]。熊彪等基于离散系统仿真软件 ARENA, 对航空兵场站油料保障



收稿日期: 2019-03-26

修回日期: 2019-05-13;

基金项目: 国家自然科学基金(61673388);

作者简介: 鞠儒生(1976-), 男, 江苏泰兴, 博士, 副教授, 研究方向为系统仿真数据评估分析, 人工智能及其应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 2678 •

系统功能模块进行了分析, 构建了航空兵场站油料保障各子模块仿真评估模型^[3]。方洋旺等提出基于云模型的仿真可信度评估方法对装备抗干扰能力进行评估^[4]。

基于上述研究, 本文应用主成分分析方法降低复杂系统仿真数据分析的维度, 探索输入输出数据之间的非线性关系, 通过计算主成分寻找影响仿真结果的关键要素并分析其演化规律。此外, 在理论研究的基础上加强应用实践, 基于原型系统对理论方法进行测试与验证。

1 主成分分析方法

主成分分析法是数学上对数据降维的一种方法, 借助于正交变换, 将其分量相关的原随机向量转化成其分向量不相关的新随机向量, 这在代数上表现为将原数据矩阵的协方差阵变换成对角形阵, 在几何上表现为将原坐标系变换成新的正交坐标系, 使之指向样本点散布最开的正交方向, 然后对多维变量系统进行降维处理, 使之能以一个较高的精度转换成低维度变量系统, 再通过构造适当的价值函数, 进一步把低维系统转化成一维系统。主成分分析法将原来众多的具有一定相关性的指标重新组合成一组较少个数的互不相关的综合指标, 不仅保留了原始变量的主要信息, 彼此之间又不相关, 更有助于抓主要矛盾。

1.1 主成分分析的数学模型

设 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 是原始变量, 要求变量 $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$, 满足 $m < p$; $\text{COV}(Z_i, Z_j) = 0$, 即 Z_i 与 Z_j 不相关; $D(Z_i)$ 较大, 要求 m 个新变量 Z_i 能代表 p 个原始变量 X_i 的大部分变异信息, 且维数降低。

用 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 做线性组合:

$$\begin{cases} Z_1 = a_{11} \times X_1 + a_{21} \times X_2 + \dots + a_{p1} \times X_p \\ Z_2 = a_{12} \times X_1 + a_{22} \times X_2 + \dots + a_{p2} \times X_p \\ \vdots \\ Z_p = a_{1p} \times X_1 + a_{2p} \times X_2 + \dots + a_{pp} \times X_p \end{cases} \quad (1)$$

简写为:

$$Z_i = a_{1i} \times X_1 + a_{2i} \times X_2 + \dots + a_{pi} \times X_p, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

这里关键是要要求 a_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, p$, 使式(2)能找到 m , 满足 $m < p$, Z_i 与 Z_j 不相关且 $D(Z_i)$ 最大, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

1.2 主成分分析计算步骤

1) 将原始数据标准化, 为方便, 将标准化的数据矩阵仍然记为 X 。

2) 计算相关系数矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

r_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, p$) 为原变量的 x_i 与 x_j 之间的相关系数, 其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

因为 R 是实对称矩阵(即 $r_{ij} = r_{ji}$), 所以只需计算上三角元素或下三角元素即可。

3) 计算特征值与特征向量

首先解特征方程 $|\lambda I - R| = 0$, 通常用雅可比法(Jacobi)求出特征值 λ_i ($i = 1, 2, \dots, p$), 并使其按大小顺序排列, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$; 然后分别求出对应于特征值 λ_i 的特征向量 e_i ($i = 1, 2, \dots, p$)。这里要求 $\|e_i\| = 1$, 即 $\sum_{j=1}^p e_{ij}^2 = 1$, 其中 e_{ij} 表示向量 e_i 的第 j 个分量。

4) 计算主成分贡献率及累计贡献率

主成分 z_i 的贡献率为

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

累计贡献率为

$$\frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

一般取累计贡献率达 85%~95%的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 所对应的第一、第二, ..., 第 $m(m \leq p)$ 个主成分。

5) 计算 m 个相应的单位特征向量

$$a_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{p2} \end{bmatrix}, a_m = \begin{bmatrix} a_{1m} \\ a_{2m} \\ \vdots \\ a_{pm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

6) 计算主成分如公式(2)所示。

2 复杂仿真系统

EINSTEIN 爱因斯坦系统是 ISAAC(最简半自治适应性作战)系统的增强版本, 与 ISAAC 相比, 爱因斯坦系统在用户界面、个体属性和规则描述、仿真结果的可视化分析以及地形定义等方面得到了加强。爱因斯坦系统是目前基于 Agent 的复杂适应系统理论研究战争复杂性问题的相对成熟的“概念演示实验系统”, 重点研究不同底层(即单个的战斗作战人员和分队作战单元)交互规则所诱发的高层涌现行为。它的主要特点是用基于 Agent 的模型来代替兰彻斯特战斗模型, 开发了一个通用的军事应用原型系统, 为军事运筹界提供了一个易用的、直观的复杂系统作战模型^[5]。

图 1 为爱因斯坦系统某一时刻的红蓝双方对抗图, 软件窗口下方注明了此时红方剩余 187 人, 伤员 5 人, 蓝方剩余 207 人, 伤员 8 人。

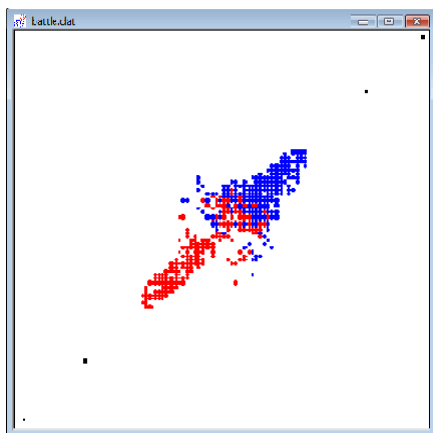


图 1 红蓝双方交战图

Fig. 1 Battle diagram between the red and blue sides

在双方兵力交战为背景的爱因斯坦系统中, 仿真结果一般是以一方歼灭另一方的兵力告终, 如图 2 所示。

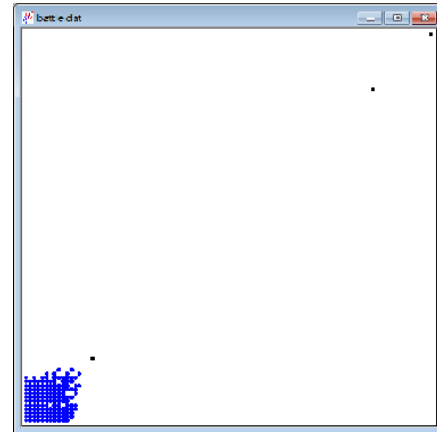


图 2 典型仿真结果图

Fig. 2 Diagram of typical simulation results

论文采用爱因斯坦系统模拟红蓝双方战斗过程, 并对红方(己方)和蓝方(敌方)的战斗参数空间包括 Agent 的感知范围、火力范围、运动范围、防御和攻击范围等参数进行评估分析, 这些属性是 Agent 的能力参数, 通过如图 3 所示配置面板进行设置。

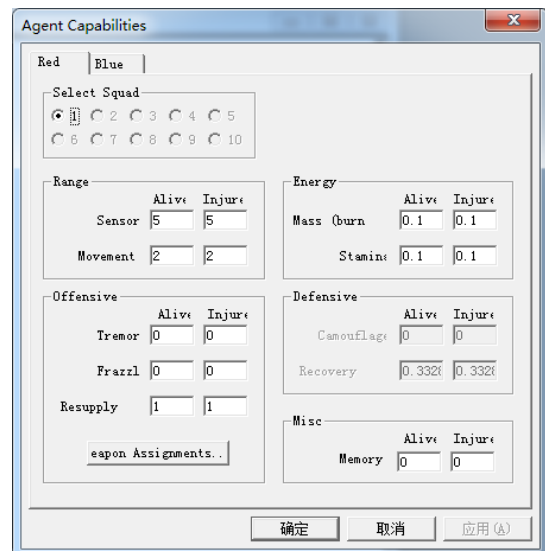


图 3 红蓝方主要战斗参数设置

Fig. 3 Main combat parameter configuration of red and blue side

实验想定: 已知红蓝双方在某区域进行军事对

抗演习, 两方兵力相向前进, 在相遇处展开战斗。仿真时长设置为 500, 交战场地位设置为 100×100 的屏幕区域, 红方的运动路线为点(1, 1)至点(99, 99), 蓝方运动路线为点(99, 99)至点(1, 1)。双方的初始兵力及武器装备配备如表 1 所示。

其中, 武器参数情况如表 2 所示(假设红蓝两方相同)。

3 原型系统实验与评估分析

基于爱因斯坦系统运行数据, 论文应用主成分分析方法对结果数据进行分析, 通过反复试验并分

析结果数据, 找到影响作战效能的关键要素, 探索输入与输出数据之间的关系。

3.1 仿真结果数据

以红蓝双方兵力对抗为想定背景, 通过改变表 1 各个参数的值并多次仿真, 最后得到如表 3 所示仿真结果数据。其中仿真结果红胜或蓝胜根据 Einstein 软件实际运行结果进行判别, 对应结果图类似图 2 所示。仿真实验时, 表 3 对表 1 初始参数随机赋值, 通过各种可能的取值以尽可能覆盖参数探索空间, 辅助用户寻找到影响仿真结果的关键参数。

表 1 红蓝双方初始兵力
Tab. 1 Initial force of red and blue side

交战双方	参战人数/人	感知范围/m	武器数量/支	运动速度/(m/s)	武器种类/种
红方	250	5	250	2	5
蓝方	250	5	250	2	5

表 2 武器参数
Tab. 2 Weapon parameters

武器名称	射程/m	速度(m/s)	弹药容量/发	火力(0~1)	爆炸半径/m	装甲(0~1)	误差/m	可靠性(0~1)
栓式步枪	7	1	0	0.1	0	0	0	1
半自动步枪	4	5	0	0.1	0	0	0.5	1
机关枪	5	10	0	0.2	0	0	0.5	0.8
手榴弹	5	1	0	0.3	3	0	0.5	1
迫击炮	6	1	0	0.5	3	0	1	1

表 3 仿真结果数据
Tab. 3 Simulation results

序号	参战人数 (红/蓝)/人	感知范围 (红/蓝)/m	行动范围 (红/蓝)/m	武器种类 (红/蓝)/种	平均火力 红/蓝(0~1)	分布范围 (红/蓝)/m	通信水平 红/蓝(0~1)	结果
1	298/246	6/5	3/4	1/1	0.1/0.1	20/50	0.3/0.6	红胜
2	235/240	7/8	6/4	2/1	0.1064/0.1	35/25	0.4/0.5	红胜
3	245/198	4/5	2/3	2/2	0.1061/0.1	40/33	0.7/0.5	红胜
4	250/270	6/4	5/2	1/1	0.1/0.1	36/28	0.6/0.3	蓝胜
5	230/150	3/3	2/2	1/2	0.1/0.18	50/34	0.6/0.5	蓝胜
6	300/289	4/5	3/4	1/1	0.1/0.1	10/30	0.4/0.7	蓝胜
7	150/200	8/3	5/2	3/2	0.127/0.115	28/15	0.8/0.6	蓝胜
8	240/180	5/6	3/5	1/2	0.1/0.1	39/22	0.6/0.9	红胜
9	256/244	4/7	3/5	4/3	0.107/0.108	33/45	0.1/0.9	蓝胜
10	179/230	4/2	4/2	2/1	0.1/0.1	23/29	0.4/0.2	红胜
11	279/300	5/8	3/6	1/1	0.1/0.1	42/38	0.7/0.3	蓝胜
12	120/250	7/5	5/3	4/3	0.158/0.108	20/40	0.9/0.1	红胜
13	294/110	4/6	3/6	3/3	0.114/0.132	30/26	0.6/0.9	红胜
14	220/190	4/4	3/2	1/1	0.1/0.1	25/15	0.4/0.7	红胜

续表

序号	参战人数 (红/蓝)/人	感知范围 (红/蓝)/m	行动范围 (红/蓝)/m	武器种类 (红/蓝)/种	平均火力 红/蓝(0~1)	分布范围 (红/蓝)/m	通信水平 红/蓝(0~1)	结果
15	250/90	3/8	2/7	1/4	0.1/0.15	20/20	0.3/0.8	蓝胜
16	260/248	5/6	2/3	2/2	0.1/0.1	30/24	0.6/0.2	蓝胜
17	233/198	4/6	4/5	1/1	0.1/0.1	34/22	0.5/0.8	红胜
18	267/225	4/7	3/5	3/5	0.152/1.22	22/56	0.4/0.5	红胜
19	236/279	5/4	4/3	3/3	0.13/0.114	9/16	0.8/0.5	蓝胜
20	290/243	3/5	2/3	1/1	0.1/0.1	27/19	0.7/0.4	红胜
21	249/238	6/7	2/4	2/2	0.1/0.1	21/32	0.7/0.3	蓝胜
22	234/267	8/4	6/1	2/1	0.109/0.1	34/12	0.5/0.5	红胜
23	123/156	3/5	1/2	5/1	0.141/0.1	35//23	0.9/0.3	红胜
24	214/228	4/3	3/2	5/5	0.119/0.121	34/23	0.8/0.6	蓝胜
25	239/300	4/5	3/2	3/2	0.108/0.1	28/25	0.7/0.5	蓝胜
26	300/268	5/5	3/2	1/1	0.1/0.1	24/21	0.5/0.2	红胜
27	290/146	5/6	3/5	1/1	0.1/0.1	23/31	0.6/0.2	红胜
28	256/289	7/9	5/6	2/2	0.12/0.1	31/26	0.5/0.9	红胜
29	271/248	8/5	5/3	1/1	0.1/0.1	34/22	0.6/0.7	红胜
30	254/233	9/6	4/2	1/1	0.1/0.1	27/20	0.6/0.3	红胜
...	...	...	...	...	...	...	...	...

3.2 主成分分析计算

针对上述实验数据,采用主成分分析方法进行解算,计算流程如图 4 所示。

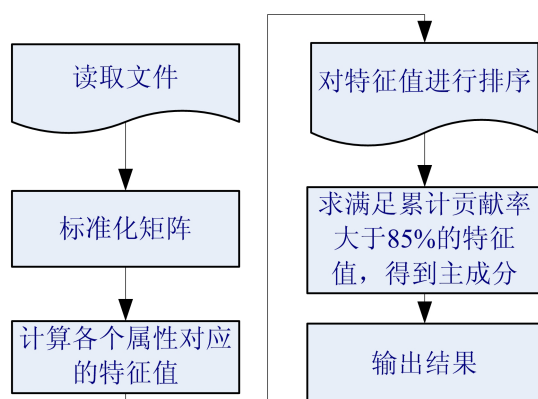


图 4 主成分分析计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of principle component analysis

基本计算步骤为:

1) 将需要分析的数据文件读入程序,用总和标准化法标准化矩阵,即各列数据除以该列总和来处理;

2) 经过标准化处理后,用雅可比法求出表 3

中 7 个属性对应的特征值,取如下对角矩阵中主对角元素

0.383 0	0	0	0	0	0	0
0	1.586 3	0	0	0	0	0
0	0	1.165 9	0	0	0	0
0	0	0	0.855 1	0	0	0
0	0	0	0	0.952 4	0	0
0	0	0	0	0	1.014 3	0
0	0	0	0	0	0	1.043 0

得到各个属性对应的特征值如下:

0.383	1.5863	1.1659	0.8551	0.9524	1.0143	1.0430
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

3) 对各个属性对应的特征值进行排序如下:

1.586 3	1.165 9	1.043 0	1.014 3	0.952 4	0.855 1	0.383
---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------

4) 按公式(5)计算特征值对应的贡献率,并将贡献率按递减顺序排序:

0.226 6	0.166 6	0.149 0	0.144 9	0.136 1	0.122 2	0.054 7
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

各属性的贡献率对比如图 5 所示。

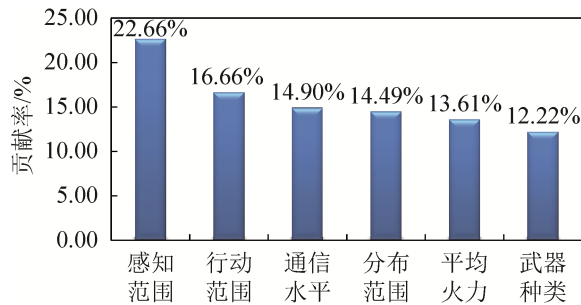


图 5 各主成分贡献率柱状图

Fig. 5 Histogram of principle factors' contribution

5) 计算主成分

根据贡献率比较结果, 七个属性中“感知范围”、“行动范围”、“通信水平”、“分布范围”、“平均火力”和“武器种类”6个属性的累计贡献率达到了 94.54%, 超过 85%, 因此这 6 个属性可作为系统的主成分。

3.3 实验结果分析

首先, 第 1 个主成分是感知范围。对于参加战斗的作战力量来说, 其感知范围越广, 发现敌情的概率也越大, 自我防御范围也可以增强。因此第 1 主成分“感知范围”无疑是影响作战效能的重要指标。

其次, 第 2 主成分是“行动范围”, 它对战斗结果的影响也很大。在战斗过程中, 战士的行动范围及速度等指标直接影响其作战效能。一个机动范围广、速度快的部队, 可以为战争夺取制胜先机。由实验结果数据可知, 当其他条件相同时, 行动范围越广, 部队的作战效能越强。

第 3 主成分是“通信水平”。提高通信水平可以加强各类作战力量之间的协同程度, 增强联合作战的能力。

第 4 主成分是“分布范围”, 从实验数据和仿真模型的观察研究中发现, 分布过密或者分布过散都不利于智能体战斗, 分布过密可能会导致单个智能体的移动受阻, 较难发起进攻; 分布过散可能会使各个智能体之间的通信减弱, 移动到战斗地点的时间较长, 也不利于取得战斗胜利。

第 5、6 主成分是“平均火力”和“武器种类”。

先进的武器装备能够直接影响战斗力, 不同的武器杀伤效果也不一样, 根据实验结果数据可知, 在其他条件相同的情况下, 武器种类越多, 火力越强, 该部队的作战效能越强。在双方势均力敌的情况下, 若想获得战争的胜利就必须配以高效能武器装备, 这也是提高部队战斗力最直接的方法之一。

上述实验结果与传统经验认识——火力越强则作战效果越好存在较大差异。事实上, 从几次海湾战争结果可以看出, 单从火力来看, 伊拉克部队水平不算低, 但由于情报侦察等感知能力全面被压制, 就像眼睛被蒙上了一样, 实际作战时火力根本无法发挥出来, 因此上述仿真评估分析结果也反映了一定的客观实际情况。

另外从实验结果可以看出, 将主成分分析算法应用于仿真结果分析领域, 可以降低数据分析的维度并找出影响作战效能的关键要素。根据分析结果, 决策者可以调整战斗部署和装备配置等, 从而更好地优化作战方案, 使得未来战斗朝着有利于己方的方向进行。

4 结论

论文基于爱因斯坦系统建立系统仿真模型, 在不同参数配置下多次运行, 并采用主成分分析方法对仿真结果数据进行分析, 计算出影响作战效能的关键要素。传统仿真评估确定指标权重通常选用专家打分法、神经网络等方法, 其中专家打分法是一种典型的定性分析方法, 不可避免地存在一定的判断误差, 神经网络方法能够很好地处理仿真评估中存在的非线性特征, 其不足是计算出的结果往往难以解释和理解。相比于上述方法, 主成分分析方法是一种定量分析方法, 具有很好的数理基础, 避免了定性判别存在的不确定性, 而且计算出的结果从数学上可以解释, 便于用户深入探究。

论文基于爱因斯坦系统开展仿真实验, 系统规模相对较小, 实验样本数量有限, 因此需要进一步研究将主成分分析方法应用于仿真大数据分析案例中, 并根据算法的应用情况进行优化。

参考文献:

- [1] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science (S0036-8075), 2006, 313(5786): 504-507.
- [2] 王华, 何伟, 陈永科. 炮兵维修分队保障行动仿真训练与评估系统[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 50-55.
Wang Hua, He Wei, Chen Yongke. Simulation Training and Evaluation System of Artillery Maintenance Unit Support Operation[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(2): 50-55.
- [3] 熊彪, 王帅, 李必鑫, 等. 基于 ARENA 的航空兵场站油料保障效能仿真评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 92-96.
Xiong Biao, Wang Shuai, Li Bixin, et al. Simulation for POL Support Effectiveness Evaluation of Air Base Based on Arena[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(4): 92-96.
- [4] 方洋旺, 郑垚宇, 魏贤智, 等. 基于云模型的仿真可信度评估方法[J]. 计算机应用, 2018, No.334(06): 15-21.
Fang Yangwang, Zheng Yaoyu, Wei Xianzhi, et al. Method for simulation credibility evaluation based on cloud model[J]. Journal of Computer Applications, 2018, No.334(06): 15-21.
- [5] 胡晓峰, 罗批, 司光亚, 等. 战争复杂系统建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 5.
Hu Xiaofeng, Luo Pi, Si Guangya, et al. War Complex System Modeling & Simulation[M]. Beijing: National Defense University Press, 2005: 5.
- [6] 王恒霖, 曹建国. 仿真系统的设计与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-22.
Wang Henglin, Cao Jianguo. The design and application of simulation system[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-22.
- [7] 廖芹, 郝志峰, 陈志宏. 数据挖掘与数学建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
Liao Qin, Hao Zhifeng, Chen Zhihong. Data mining and math modeling[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [8] 朱玉全, 杨鹤标, 孙蕾, 等. 数据挖掘技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006: 11.
Zhu Yuquan, Yang Hebiao, Sun Lei, et al. Data Mining Technique[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006: 11.
- [9] 胡剑文, 常青, 张岱, 等. 作战仿真实验设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 5.
Hu Jianwen, Chang Qing, Zhang Dai, et al. Combat Simulation experiment design and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 5.
- [10] Philip Barry, J P Zhang, M Mcdonald. Architecting a Knowledge Discovery Engine for Military Commanders Utilizing Massive Runs of Simulations[C]. Proceeding of SIGKDD. ACM, 2003: 699-704.