

## 基于数据站场的系统效能评估决策支持方法\*

陈晨<sup>1,2</sup>, 王赞<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081;

2. 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**随着信息技术的发展,系统信息量的提升给军事系统效能评估带来了新的问题。针对系统效能分析数据非线性、高维数、强耦合的特点,提出了一种基于数据站场技术的效能评估决策支持方法。通过数据恢复、约减、求精与重构操作,对评估数据进行了处理,并搭建了数据站场立方体,降低了数据间的依赖性,满足了不同层面系统分析的需求。以面向任务的网络化火控系统的为例,进行了系统效能评估、时效性评估和指标分析,从三个层次验证了方法的有效性与可行性。将数据挖掘技术应用到仿真系统效能评估决策中,获得了更广泛的应用。

**关键词:**评估数据处理;数据挖掘;数据站场;动态评估

**中图分类号:** N945.25/TP 391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-0124-07

## Data yard based system effectiveness evaluation and decision support method

CHEN Chen<sup>1,2</sup>, WANG Yun<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

**Abstract:** With the development of information technology, the increase of system information brings new problems to the military system effectiveness evaluation. Aiming at nonlinear, high dimension and strong coupling data of system effectiveness analysis, a data yard based system effectiveness evaluation and decision support method was proposed. Data recovery, subtraction, refinement and reconstruction operations were applied to the simulation data processing, then a data yard cube was built up to meet the multiple demands for system analysis of different levels and data dependency were reduced. Taking task-oriented networked fire control system for example, its system effectiveness evaluation, timeliness evaluation and indices analysis were carried out, and practicability and validity of the method were verified in three levels. Applying data mining technology to the simulation system effectiveness evaluation decision-making, makes it get more extensive application.

**Key words:** evaluation data processing; data mining; data yards; dynamic evaluation

随着科技现代化进程逐渐加快,系统的规模将变得十分庞大,相应地,仿真系统产生的数据也将变得极为复杂。由于系统评估数据存在非线性、非结构化和高维数等问题,传统的评估数据分析方法已经不再适用于复杂大系统。

为了对系统性能进行改进,同时为指挥决策者提供有力的决策支持,研究利用大量复杂的仿真数据来动态评估子系统与大系统性能的方法是十分必要的。数据挖掘与数据站场技术为处理这类仿真数据研究提供了有力的技术保证。本文基于数据挖掘与数据站场技术,针对现阶段系统效能评估决策支持存在的问题,构建了数据站场的

模型,并利用面向任务的网络化火控仿真系统进行了方法验证。

### 1 数据挖掘与数据站场技术

评估数据挖掘是从仿真输出的评估数据中发现知识的过程,在利用元数据构建数据仓库之后,对其应用联机数据处理<sup>[1-2]</sup>等技术挖掘出知识规则。

数据站场与数据仓库的主要区别在于最终用户的侧重点不同。对于现阶段仿真系统,利用数据站场处理评估数据即可。

目前,数据挖掘的研究以应用型为主,对于数

\* 收稿日期:2013-06-27

**基金项目:**国家杰出青年科学基金资助项目(60925011);国家自然科学基金资助项目(61203181);北京理工大学基础研究基金资助项目(20120642004)

**作者简介:**陈晨(1982—),女,北京人,讲师,博士,硕士生导师,E-mail:xiaofan@bit.edu.cn

据挖掘相关理论尚未有成熟的框架性理论成果。数据挖掘与数据站场大多倾向于规则的攫取,很少有人将其应用于系统评估与决策支持。

薛青等将粗糙集方法应用于作战仿真数据挖掘中<sup>[3]</sup>。William等将仿真数据挖掘与一般数据挖掘加以比较<sup>[4]</sup>。鞠儒生等提出了基于模糊规则与支持向量机的数据挖掘方法,对仿真数据挖掘加以完善和改进,并提出将其应用于决策支持的理念<sup>[5]</sup>。黄柯棣等提出了基于数据耕种的系统评估方法,将指标数据耕种于系统内部,让其在特定平台生长,最后与挖掘出的结果数据比对<sup>[6]</sup>。李清毅等将数据挖掘应用于卫星仿真数据站场构建与评估中<sup>[7]</sup>。卢盈齐等将数据仓库技术应用于C<sup>4</sup>ISR系统效能评估中<sup>[8]</sup>。白春杰等研究了基于数据仓库的数据挖掘技术,并提出了基于数据仓库的船舶损伤快速评估系统<sup>[9]</sup>。戴超凡等提出了一个通用的元数据模型,用以支持数据仓库的管理与维护<sup>[10]</sup>。胡小平等提出了应用数据挖掘方法从数据仓库的角度对液体火箭发动机进行故障检测和诊断的策略<sup>[11]</sup>。陈杰等实现了对复杂武器系统总体设计综合分析与集成<sup>[12]</sup>。

## 2 系统效能评估决策问题分析

现阶段,仿真系统与评估相关的问题总结起来大致有以下两点。

一是仿真数据具有大量、非结构特性。现阶段系统平台具有复杂性特点,单次仿真会产生几个G数量级的数据。又因为指标的非线性特征,可能会导致计算出现维数灾的现象,进而导致系统评估工作不能正常进行,不能为指挥人员提供有力的决策支持。

二是系统需要进行多角度、多层次分析。仿真不再仅局限于对系统整体效能的评估,而是已经渗透各个子系统。由于子系统之间有着紧密的关系,可能出现一个评估底层指标影响不同子系统的性能;由于指标体系的建立不是按照子系统的性能加以分解的,而是按照系统性能分解的,这使得无法通过指标体系计算评估出相应系统的效能值。

数据量大已经成为仿真评估数据处理的主要问题,而为了评价分析单一指标性能去重新构建指标体系也是没有必要的。

综上分析,构建一种能够克服仿真评估数据

问题并且能够动态评估系统各组成部分性能的方法是本文重点解决的问题。

## 3 基于数据站场的系统效能评估决策支持模型

### 3.1 系统效能评估数据站场构建

将仿真系统比作一个庞大的数据仓库,针对子系统效能评估与决策支持就要构建部门级别的数据站场。以仿真结果数据作为挖掘元数据,构建数据站场模块,进行求精与重构操作,构成系统评估数据站场。

#### 3.1.1 数据恢复与约减

数据恢复主要处理由于设备特性导致的数据缺失这一现象。本文采用填补方法对数据进行恢复以解决数据缺失问题,并选取了基于Newton插值的差商恢复模式来拟合系统过程数据。

数据约减主要分为属性约减与属性值约减。属性约减相当于从系统过程与结果数据表中消去不必要的列,而属性值约减相当于从系统过程与结果数据表中消去一些无关紧要的属性值<sup>[13]</sup>。操作如下:

For each data class

Begin

Initialize universe of objects

Select data class

Find class relation

Repeat

For each attribute do

Begin

Select attribute

Find equivalence relation

Find lower subset

Find upper subset

Calculate discriminant index

End

Select attribute with highest discriminant index

Generate rules

Reduce universe of objects

Reduce data relation

Until no objects with selected data class

End

通过采用上述操作,按照代数与逻辑判断准则约减净化与系统需求无关的数据,使得过程与结果数据能更简练、更精准地反映相应的数据属性。

#### 3.1.2 数据重构与求精

数据重构工程负责检验数据是否满足用户分

析需求。行匹配列合并运算<sup>[14]</sup>能很好地应用于根据数据表构建数据站场的过程。

本文以面向任务的网络化火控系统为例,该系统包含了火控系统、火力系统、目标等多个子系统,其仿真数据包括仿真时间、仿真方案号、仿真部署情况、打击信息等多个单值属性与多值属性数据。根据行匹配列合并运算的定义,单值属性数据可用矩阵表示为 $(d_s^j)^i = [(\beta_1^j)^i, (\beta_2^j)^i, \dots, (\beta_n^j)^i]$ ,多值属性数据可用矩阵表示为

$$(d_n^j)^i = \begin{bmatrix} (\beta_{11}^j)^i & (\beta_{12}^j)^i & \dots & (\beta_{1s}^j)^i \\ (\beta_{21}^j)^i & (\beta_{22}^j)^i & \dots & (\beta_{2s}^j)^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\beta_{n1}^j)^i & (\beta_{n2}^j)^i & \dots & (\beta_{ns}^j)^i \end{bmatrix}$$

$i$  表示第  $i$  个方案,  $j$  表示第  $j$  个子系统。

数据表包括方案的单值属性表与子系统的单、多值属性混合表。那么先将第  $j$  个子系统的单值属性集 $(d_s^j)^i$ 与多值属性集 $(d_n^j)^i$ 进行行匹配列合并运算得:

$$\cup((d_s^j)^i, (d_n^j)^i) = \begin{bmatrix} (\beta_1^j)^i & (\beta_2^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i(\beta_{11}^j)^i & (\beta_{12}^j)^i & \dots & (\beta_{1s}^j)^i \\ (\beta_1^j)^i & (\beta_2^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i(\beta_{21}^j)^i & (\beta_{22}^j)^i & \dots & (\beta_{2s}^j)^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\beta_1^j)^i & (\beta_2^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i(\beta_{n1}^j)^i & (\beta_{n2}^j)^i & \dots & (\beta_{ns}^j)^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

第  $i$  个方案的单值数据的集合可用矩阵表示为 $p^i = [\alpha_1^i, \alpha_2^i, \dots, \alpha_m^i]$ ,其中  $p^i$  指第  $i$  个方案的单值属性集合,集合中的 $\alpha_1^i, \alpha_2^i, \dots, \alpha_m^i$ 分别表示方案号、仿真时间等  $m$  个属性,则第  $i$  个方案的单值属性加入到使用第  $i$  个方案时,在第  $j$  个子系统的矩阵中使用行匹配列合并运算,获取过程如下:

$$\cup(p^i, \cup((d_s^j)^i, (d_n^j)^i)) = \begin{bmatrix} \alpha_1^i & \dots & \alpha_m^i & (\beta_1^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i & (\beta_{11}^j)^i & \dots & (\beta_{1s}^j)^i \\ \alpha_1^i & \dots & \alpha_m^i & (\beta_1^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i & (\beta_{21}^j)^i & \dots & (\beta_{2s}^j)^i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1^i & \dots & \alpha_m^i & (\beta_1^j)^i & \dots & (\beta_1^j)^i & (\beta_{n1}^j)^i & \dots & (\beta_{ns}^j)^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)记为第  $i$  个方案关于第  $j$  个子系统的信息矩阵。

同理可获得第  $i$  个方案关于所有子系统的信息矩阵,进而得出第  $i$  个方案关于整个系统的信息矩阵。

采用同样的方法就可以将不同方案及其子系统数据表构成的信息矩阵再进行集合,重构出数据站场立方体。虽然立方体数据矩阵中存在大量冗余信息,但它每一行都是完整的,大大降低了数

据间的依赖性。

上述方法重构出的数据站场立方体极为庞大,它包含了许多与决策无关或者无用的数据,接下来就是要对上述构建的数据立方体进行数据求精操作。

数据求精模块的任务是净化资源中的数据、增加资源戳和时间戳、将数据转换为符合数据站场的格式、预算概括和衍生数据的值。

针对面向任务的网络化火控系统仿真数据矩阵,采用支持向量机法对仿真数据进行精简。根据投影变换与选择变换对数据矩阵进行冗余数据清洗,任意矩阵通过上述两种变换都可以进行精简。投影变换使得矩阵列规模减少,选择变换使得矩阵行规模减少。

在具体操作时,为了有效控制数据精度,可将支持向量机法与选择/投影变换穿插使用;为了有效控制数据规模,可将求精与重构穿插使用。

### 3.2 系统效能评估方法

系统效能评估主要分为三个评估层次,分别是系统的效能评估、子系统(功能模块)的效能评估和指标的效能评估与分析,不同层次的评估有与之相适应的方法。在第 4 节仿真实例中,将采用模糊综合评价方法、效用函数方法和灰色白化函数法相结合的形式来对系统性能进行组合评估。

为了权衡指标多样性与算法计算量的矛盾,本文采用了基于漂移度的组合评价模型。在该模型中,将标准化后的相容性评价方法综合评价值求取的平均值,作为各种方法评价结论漂移性测度的参照系,得出相关系数  $r$ ,计算出漂移度  $p = 1 - r$ 。组合评估对漂移度大的评价方法赋予较小的权重,对于漂移度较小的评价方法赋予较大的权重。

设相容方法集中有  $b$  种评价方法,第  $i$  种评价方法的漂移度为  $p_i$ ,第  $i$  种方法权重如下:

$$\omega_i = \frac{\max_{1 \leq i \leq b} p_i + \min_{1 \leq i \leq b} p_i - p_i}{\sum_{i=1}^b (\max_{1 \leq i \leq b} p_i + \min_{1 \leq i \leq b} p_i - p_i)} \quad (i = 1, 2, \dots, b) \quad (3)$$

最后通过加权得出系统的评估结果。

### 3.3 基于数据站场的子系统效能动态评估

面向任务的网络化火控系统<sup>[15]</sup>的指标体系如图 1 所示,基于系统完成任务能力建立了指标体系,包括系统信息获取效能、信息处理效能、信息利用效能和信息保障能力。每一级指标都含有

多个子指标。



图 1 面向任务的网络化火控系统的指标体系  
Fig. 1 Indexes of networked fire control system

考虑到评价系统的时效性,指标主要包含系统响应时间和运行速率。但是这些指标分散在指标体系的各个不同能力指标中,不能直接计算。运用本文提出的基于数据站场的子系统效能动态评估模式,就可以根据决策者实际的需求构建指标体系,实现系统的按需动态评估,如图 2 所示。

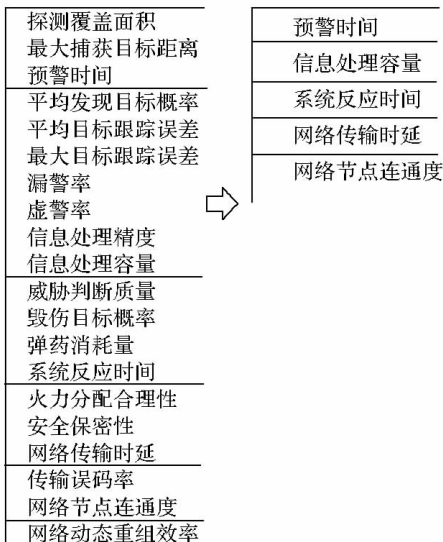


图 2 时效性的描述指标  
Fig. 2 Indexes of timeliness

按照前述的数据恢复与约减方法,数据重构与求精工程操作之后的数据站场立方体模块如图 3 所示。

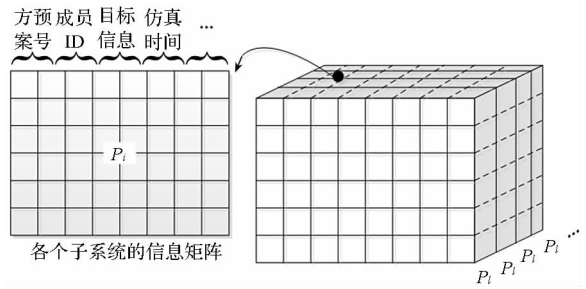


图 3 数据站场立方体模块

Fig. 3 Module of data yard cube

数据站场立方体搭建之后,可以选取立方体中特定功能域的数据对其相对应的功能域进行评估决策分析,数据选取过程如图 4 所示。

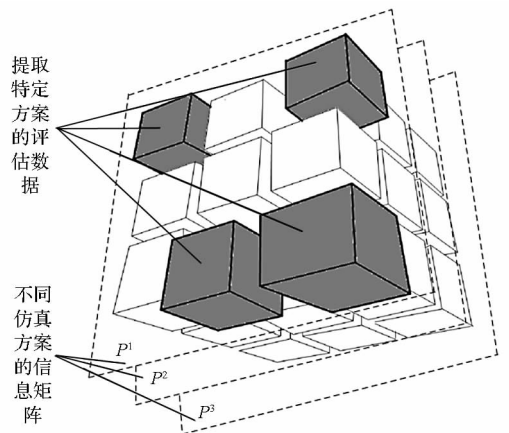


图 4 数据立方体到评估数据的提取

Fig. 4 Evaluation data extracted from data cube

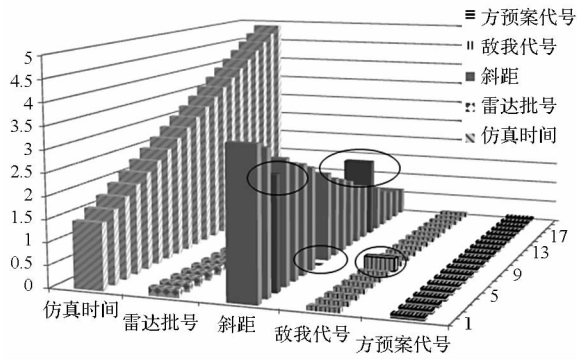
在数据站场立方体的基础上加以提取,便得到站场评估数据,对  $P^1$  方案中与评估有关数据进行提取,用以评价大系统或子系统性能。

### 4 仿真实例与分析

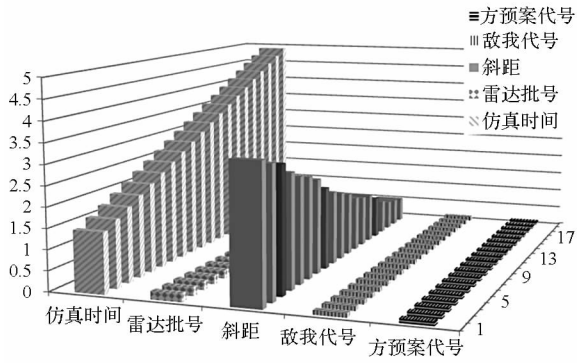
本节借助面向任务的网络化火控系统仿真平台得到仿真数据,分析了数据站场在系统效能评估与指标性能决策支持中的应用。本实验中涉及到的数据皆来自仿真结果,不涉及任何型号参数。

#### 4.1 数据恢复与约减实例

选取仿真系统中火控系统的部分探测数据为例,分析绘制数据统计图如图 5(a) 所示,从中可直观地发现数据中存在两处异常、一处缺失。利用数据约减操作,按照代数逻辑规则剔除第 8 组错误信息后,再对两处异常数据采取摒弃原有数据并进行差值拟合的操作。最终系统数据恢复结果如图 5(b) 所示。



(a) 拟合前



(b) 拟合后

图 5 拟合数据统计图

Fig. 5 Fitting of data statistics

通过数据恢复与约减处理,使得系统数据具备较好的运算性能,从而具有较高的评估决策价值。

### 4.2 数据站场实例

仿真数据包含多个涉及单值属性与多值属性的数据表,现采用数据求精与重构相结合的策略来构建数据站场立方体。

求精是针对所有数据表的操作,对于仿真

单值与多值属性并存的数据表,如目标探测数据表,其中包含多个数据项。由于雷达旋转的探测特性,数据库中会存入很多空、非真或无用数据,如表 1 所示,利用模型精简后数据如表 2 所示。

表 1 目标探测数据表

Tab. 1 Target detection data table

方案 ID	仿真时间	目标号	斜距	方向角	高低角
0108	1323	1	11.635	1473	6.261
0108	1325	1	0	0	0
0108	1327	1	10.089	1468	5.460
0108	1327	0	10.544	1463	5.674
0108	...	...	...	...	...

表 2 目标探测数据精简表

Tab. 2 Streamlined target detection data table

方案 ID	仿真时间	目标号	斜距	方向角	高低角
0108	1323	1	11.635	1473	6.261
0108	1327	1	10.089	1468	5.460
0108	1327	0	10.544	1463	5.674
0108	...	...	...	...	...

同理对余下数据表格做相类似操作,以精简且不漏掉与系统性能相关的信息为目标。另还有其他表格存储了目标速度、射击次数、总毁伤等数据。

对所有数据表格进行求精之后,就可以进行重构工作。采用行匹配列合并的算法将其合并得到仿真信息矩阵,如表 3 所示。

表 3 信息矩阵

Tab. 3 Information matrix

方案 ID	仿真时间	目标号	斜距	方向角	高低角	斜距方向速度	方向角方向速度	高低角方向速度	射击弹数	射击次数	总毁伤
0108	1323	1	11.635	1473	6.261	-0.2728	-1.9730	2.0939	24	3	0.4213
0108	1327	0	10.089	1468	5.460	-0.2727	-2.1696	2.1011	24	4	0.5275
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0108	1327	1	10.544	1463	5.674	-0.2726	-2.3972	0.1094	36	1	0.0153
0108	1329	0	9.9993	1459	5.908	-0.2723	-2.6623	1.1191	36	2	0.0471
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

表 3 仅是系统信息矩阵的一部分,根据不同方案号构成的信息矩阵组合就可以构成数据站场立方体。所构建的立方体的复杂度与维数都较数

据库中的数据大大降低,规模缩减为原数据规模的 1/50 ~ 1/20。

### 4.3 系统效能动态评估实例

所谓动态评估,是指根据不同评价需求结合指标间层次关系,利用评估决策技术对系统性能加以评价。

系统效能动态评估是按照数据站场中的信息,提取出数据站场评估指标值。指标值和层次分析法确定的各指标相对于系统效能权重如表 4 所示。

表 4 数据站场评估指标值

Tab. 4 Evaluation indexes values of data yard

	探测覆盖面积	最大捕获目标距离	预警时间	平均发现目标概率	平均目标跟踪误差	最大目标跟踪误差	漏警率	虚警率	信息处理精度	信息处理容量
指标值	50 892km <sup>2</sup>	11 861m	119.3s	0.86	27.56m	48.78m	0.08	0	19.96m	8
权重	0.018 20	0.024 57	0.021 84	0.026 39	0.050 62	0.035 18	0.053 25	0.029 95	0.108 00	0.070 20
	威胁判断质量	毁伤目标概率	弹药消耗量	系统反应时间	火力分配合理性	网络传输时延	传输误差率	安全保密性	节点连通度	网络动态重组效率
指标值	0.92	0.6885	1236	7.8s	0.76	200ms	0.01	4	8	0.88
权重	0.091 80	0.119 00	0.051 00	0.044 49	0.036 80	0.036 04	0.028 64	0.027 72	0.066 00	0.060 31

#### 4.3.1 系统评估

采用模糊综合评价方法、效用函数方法、灰色白化函数法对上述指标值进行计算,最终算出系统效能值为  $E = \sum_{i=1} \omega_i u_i \approx 0.80$ 。单位“1”代表系统性能优秀。通过等级对应关系知,系统性能总体为“优”。

#### 4.3.2 时效性评估

时效性指标包含预警时间、信息处理容量、系统反应时间、网络传输时延与网络节点连通度。

各指标对系统效能的影响因子为  $\{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\} = \{0.02184, 0.0702, 0.0432, 0.03604, 0.066\}$ ,而各自对于时效性的影响因子为  $T_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^5 W_i}$ ,得到的权重为  $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$

$= \{0.09226, 0.29570, 0.18197, 0.15206, 0.27801\}$ 。

利用效用函数计算的系统时效性为  $E = \sum_{i=1}^5 T_i u_i \approx 0.822$ 。单位“1”代表系统性能优秀。通过对应关系知,系统时效性指标性能为“优”。权重关系也可以通过专家知识录入。

#### 4.3.3 指标评估分析

数据站场不仅可以对系统特定性能进行动态评估,还可以进行指标分析。例如,对于目标探测能力指标,可以提取数据站场中目标飞行信息与我方目标探测信息进行对比,以高低角为例,如图 6 所示。

通过对比可以看出,高低角误差维持在较小的范围内,系统具有较好的探测特性。目标数据

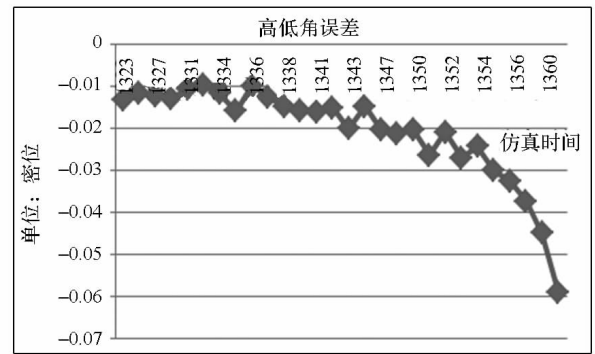
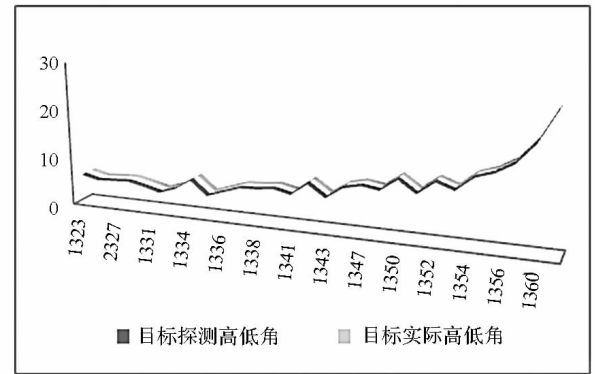


图 6 探测特性指标对比

Fig. 6 Contrast of detection indexes

耕种模式与探测数据挖掘模式符合系统实际情况,仿真具有较高的可信度。

## 5 结论

本文针对分布式仿真评估中数据高维度、高复杂性的特点,建立了仿真数据站场模型。通过数据挖掘的恢复约减和求精重构操作,构建了数据站场立方体,满足了不同层面的评估决策需求,并大大降低了仿真数据的维数与数据间的依

赖性。

该方法可以应用于其他仿真系统效能评估决策中,为指挥决策与系统性能改进提供技术支持与信息保障。

## 参考文献 (References)

- [1] 张继福, 郑链, 史虹. 联机分析处理与关联规则挖掘的集成化模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 121 - 126.  
ZHANG Jifu, ZHENG Lian, SHI Hong. Research on integration of online analytical processing and association rules mining[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(2):121 - 126. (in Chinese)
- [2] 高洪深. 决策支持系统理论与方法[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社, 2009.  
GAO Hongshen. Decision support system theory and method [M]. 4th. edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 张文明, 薛青. 粗糙集方法在作战仿真数据挖掘中的应用[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 179 - 181.  
ZHANG Wenming, XUE Qing. Application of rough set in data mining of warfare simulation[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2):179 - 181. (in Chinese)
- [4] William W L, Mark S. Data mining through simulation[J]. Neuroinformatics, 2007, 401:155 - 166.
- [5] Jo R S, Qiao H Q, Huang K D. Test and evaluation of HLA simulation system based on data mining [J]. System Engineering and Electronics, 2006, 28(10):1599 - 1602.
- [6] 黄柯棣, 鞠儒生, 黄健, 等. 基于数据耕种的作战仿真理论及其关键技术研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3337 - 3341.  
HUANG Kedi, JU Rusheng, HUANG Jian, et al. Research overview towards theory and key techniques of combat simulation systems based on data farming [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13):3337 - 3341. (in Chinese)
- [7] 李清毅. 数据挖掘在卫星仿真数据分析与评估上的应用[J]. 质量与可靠性, 2010(2):19 - 22.  
LI Qingyi. Application for satellite data analysis and evaluation based on data mining[J]. Quality and Reliability, 2010(2): 19 - 22. (in Chinese)
- [8] Lu Y Q, Zhu C Y, Li S. Data warehouse technique application in C4ISR system efficiency evaluation[J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(1):18 - 20.
- [9] 白春杰, 吴晓平, 严承华. 基于数据仓库的船舶损伤快速评估系统框架研究[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(4):110 - 112.  
BAI Chunjie, WU Xiaoping, YAN Chenghua. A structure design of ship fast evaluation system based on data warehouse [J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(4):110 - 112. (in Chinese).
- [10] 戴超凡, 邓苏, 杨强, 等. 基于 GMM 的数据仓库管理与维护[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(6): 82 - 86.  
DAI Chaofan, DENG Su, YANG Qiang, et al. Management and maintenance of data warehouse based on GMM [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(6): 82 - 86. (in Chinese)
- [11] 胡小平, 张丽娟, 王艳梅, 等. 液体火箭发动机故障检测和诊断中数据挖掘策略的分析[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(3):1 - 5.  
HU Xiaoping, ZHANG Lijuan, WANG Yanmei, et al. The Analysis of data mining strategy in fault detection and diagnosis of the liquid rocket engine[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(3):1 - 5. (in Chinese)
- [12] 张佳, 窦丽华, 陈杰. 复杂武器系统总体设计综合集成方法的实现[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(5):415 - 419.  
ZHANG Jia, DOU Lihua, CHEN Jie. Optimization design of complex weapon equipment systems based on meta synthesis method[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(5):415 - 419. (in Chinese)
- [13] 宣慧玉, 张发. 复杂系统仿真及应用[M]. 北京:清华大学出版, 2008.  
XUAN Huiyu, ZHANG Fa. Complex system simulation and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 陈永府, 杨小献, 陈立平, 等. 面向决策支持的数据重构技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(6): 831 - 837.  
CHEN Yongfu, YANG Xiaoxian, CHEN Liping, et al. Data reconstruction for decision-making support [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(6):831 - 837. (in Chinese)
- [15] Dong S K, Zhang J, Chen C. Information stream based effectiveness evaluation of air defense networked fire control system[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, China: IEEE, 2011:1664 - 1669.