

基于模糊层次分析法的指挥信息系统仿真试验可信性评估

綦磊升, 张晓娜, 门星火, 刘波

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 随着指挥信息系统仿真试验的应用, 其仿真试验可信性问题越来越成为关注的重点。仿真试验可信性是评价仿真试验成功与否的重要指标。本文基于模糊层次分析法的思想和原理, 结合指挥信息系统仿真试验过程, 建立了指挥信息系统仿真试验可信性评估指标体系, 并结合炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验实例进行了验证, 对如何评估指挥信息系统仿真试验可信性做了一定的研究和探讨。

关键词: 指挥信息系统; 模糊层次分析法; 仿真试验; 可信性

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Credibility Evaluation of the C4ISR System Simulation Test Based on the Fuzzy AHP Method

QI Leisheng, ZHANG Xiaona, MEN Xinghuo, LIU Bo

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: With the application of the C4ISR system simulation test, the credibility of simulation test has increasingly become the focus of attention. And the credibility evaluation is an important index to evaluate the success of simulation test. Based on the principle of fuzzy analytic hierarchy process (AHP), the evaluation index system is established according to the simulation test process of C4ISR system. Combined with the example of intelligence processing simulation test of the artillery company, this paper conducts some research and discussion on how to evaluate the credibility of simulation test of the C4ISR system.

Keywords: C4ISR system; fuzzy AHP; simulation test; credibility evaluation

1 引言(Introduction)

随着计算机技术和建模与仿真技术的飞速发展, 在新型指挥信息系统装备采办过程中, 仿真试验已成为装备试验与鉴定的一项重要措施。但是随着仿真技术的发展和仿真需求的增加, 对指挥信息系统仿真试验结果是否可信、可信的程度如何, 关注程度也越来越重视。从某种意义上说, 只有保证了仿真系统、仿真试验方案、试验数据等的正确性和可信性, 最终得到的仿真试验结果才有实际应用的价值和意义^[1-3]。如何评估指挥信息系统仿真试验的正确性和可信性是指挥信息系统试验中需要重视和研究的主要问题。可信性评估一方面可以有效地提高仿真试验系统的有效性水平和试验结果的正确性, 增强使用者的信心; 另一方面可降低仿真试验系统应用的风险, 提高系统使用效益^[4]。

2 指挥信息系统仿真试验可信性影响因素分析 (Analysis of influence factors of credibility evaluation of the C4ISR system simulation test)

2.1 指挥信息系统仿真试验过程分析

指挥信息系统仿真试验是指利用仿真技术对实际的指

挥信息系统及其技术进行鉴定与评估的一种过程, 其本质是系统在仿真条件下的试验活动, 包括确定试验对象和目标, 建立仿真模型, 构建试验环境, 设计试验方案, 开展仿真试验, 采集试验数据, 评估试验结果等。指挥信息系统仿真试验连接关系如图1所示。在这种环境下, 仿真试验系统主要用于被试指挥信息系统运行所需的外部环境的构建, 包括各类ISR、指控、武器等, 以及相关蓝方兵力及活动情况。试验运行过程中, 在想定的驱动下, 为被试装备提供运行所需的激励信息, 并能接收和响应被试装备发送的信息和指令, 试验组织者利用实时导调功能也可对蓝方的兵力进行导调干预指挥。

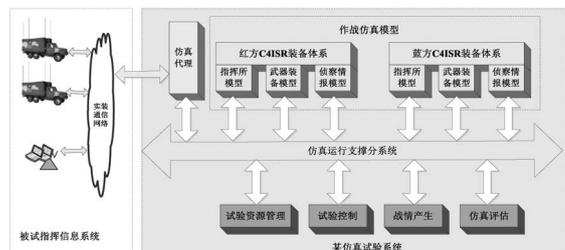


图1 指挥信息系统仿真试验连接关系图

Fig.1 The association of the C4ISR system simulation test

指挥信息系统仿真试验按照其组织过程一般可以分为三个阶段,分别是试验设计与准备阶段、试验实施阶段、试验总结分析阶段,如图2所示^[5]。

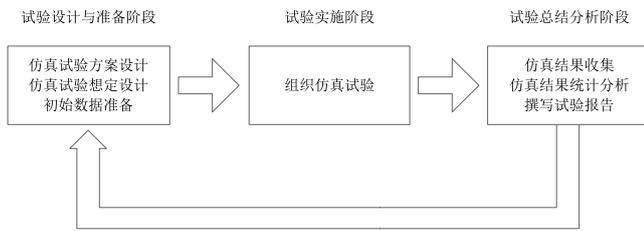


图2 指挥信息系统仿真试验的一般过程

Fig.2 The common process of the C4ISR system simulation test

指挥信息系统仿真试验设计与准备阶段,主要进行仿真试验方案设计、仿真试验想定设计和初始数据准备。仿真试验方案主要内容包括需求分析、思路与方法、保障需求、安全风险分析等。仿真试验想定为指挥信息系统仿真试验提供初始条件、参战单位、结束条件等,包括为指挥信息系统仿真试验中仿真系统的运行提供预先安排的一些动作、活动或命令等初始条件和约束条件。初始数据包括基础数据和生成数据两类。基础数据包括地形数据、军标数据、武器装备性能数据等,而生成数据主要是对想定进行细化和结构化后生成的数据,如编制数据、编成数据、部署数据等。

指挥信息系统仿真试验实施阶段主要是按照仿真试验实施方案或试验大纲、细则,进行仿真试验,是从指挥信息系统现场仿真试验开始至试验实施计划中规定的所有试验项目组织完毕的整个过程,是试验鉴定最关键的阶段。

试验总结分析阶段包括仿真结果收集、仿真结果统计分析、撰写试验报告等环节。仿真结果收集是对单次或多次的仿真试验数据进行收集、分类、排序等,选择对最终试验结果有用的数据集。试验结果统计分析,主要是将试验所获取的、经初步处理的大量数据进一步加以整理、加工和处理,应用统计分析和图解分析的方法,把试验数据转换成能够表征试验结果的相关变量,进行定量和定性相结合的分析。然后,与被试装备体系的评估指标、研制总要求和研制任务书中规定的作战要求和相应变量的评定标准进行比较分析,以评价装备体系的战术技术性能和作战效能,鉴定其是否满足作战使用要求,或者评估某装备对整个体系的贡献率。

2.2 指挥信息系统仿真试验影响因素分析

结合指挥信息系统仿真试验的一般过程,对影响指挥信息系统仿真试验可信性的因素进行分析。从试验设计与准备阶段、试验实施阶段和试验总结分析阶段这三个阶段的主要工作可以看出,影响指挥信息系统仿真试验可信性的因素主要是数据、模型、仿真试验系统、仿真结果的可信性。而这

些因素又受到诸多因素的影响,因此,仿真试验可信性是大量影响因素共同作用下,描述仿真试验系统与仿真试验目的相适应程度的一个总体指标。

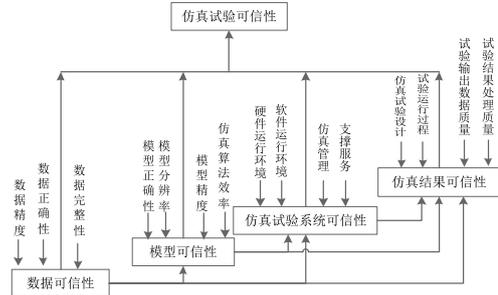


图3 指挥信息系统仿真试验可信性的主要影响因素

Fig.3 The main influence factors of the C4ISR system simulation test

由图3可见,数据可信性是仿真可信性的基础,模型可信性是仿真可信性的灵魂,仿真结果是仿真的产物,是模型、数据、仿真试验系统、仿真试验等诸因素的集中反应。数据可信性、模型可信性、仿真试验系统可信性都会对仿真结果产生不同程度的影响,仿真试验设计、试验实施过程、仿真试验结果处理等环节也会影响仿真结果的可信性。如仿真结果的处理过程中可能由于数据的遗漏处理、重复处理、错误处理而使得最终结果和仿真输出不一致,影响仿真的可信性。仿真结果全面反映了仿真全过程的影响,在某种程度上甚至可以说,仿真结果的可信性就代表了仿真可信性。

数据可信性是指仿真试验中使用的数据,对仿真满足仿真应用目的的影响程度。这里所说的数据,指的是用于支持模型运行的数据,而不包含仿真结果数据。

模型可信性是指仿真试验中所用的模型,对仿真满足仿真应用目的的影响程度。

仿真试验系统可信性是指仿真试验系统的结构及运行,对仿真满足仿真应用目的的影响程度。

仿真结果可信性是指在特定的仿真应用目的下,运行仿真试验系统进行仿真试验,产生的试验结果数据对仿真对象客观规律的反映程度。

3 基于模糊层次分析法的指挥信息系统仿真试验可信性评估(Credibility evaluation of the C4ISR system simulation test based on fuzzy AHP method)

3.1 基于模糊层次分析法的可信性评估方法

模糊层次分析法是层次分析法和模糊综合评判法相结合的方法,主要是为了克服传统层次分析法中人的主观判断、选择、偏好等对结果影响很大的缺点,使评估更加趋于合理。运用模糊层次分析法对仿真试验进行可信性评估分析的评估框架如图4所示。该框架包括评估模型、评估过程和评

估方法三个重要组成部分。其中评估模型采用层次分析法构建，各层指标分别为仿真试验可信性的影响因素。评估过程包括指标合成和指标分析，其中指标合成在这里主要指各评估因素的权重计算过程^[6,7]。

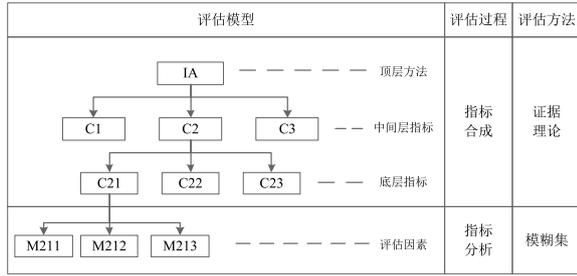


图4 运用模糊AHP进行可信性评估的基本框架

Fig.4 The basic framework of credibility assessment by fuzzy AHP

运用模糊AHP法进行可信度量化的一般步骤如下^[8,9]：

步骤1：自顶向下逐层细化影响仿真试验可信性的指标因素，建立系统的多层次递阶结构，形成可信性评估的因素集U。

步骤2：结合仿真试验目的和专家经验，建立可信性评估的决策集V。

步骤3：选择可信性评估的底层指标进行单因素评判，包括建立单因素评判的因素集和评判集，构造两两对比判断矩阵，计算权重向量，进行一致性检验和计算单因素评判的可信度五部分。

步骤4：逐层计算各层次元素对系统总目标的组合权向量，进行模糊综合评判。

步骤5：对评判结果进行分析和表示。

3.2 指挥信息系统仿真试验可信性评估

3.2.1 层次划分

根据指挥信息系统的级别、试验项目，仿真试验中需采用不同的模型，本文以炮兵连指挥信息系统的情报处理仿真试验为例，对其仿真试验可信性进行分析评估。根据前文分析，影响指挥信息系统仿真试验可信性的主要因素包括四个方面：数据、模型、仿真试验系统、仿真结果。对炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验而言，仿真试验系统中使用的模型主要是红方装备体系模型中的侦察车模型和营指挥车模型，目标情报信息主要由战情产生分系统产生，未使用蓝方装备体系模型。

为简化问题并突出主要因素，在炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验中，仿真试验系统与测试装备之间采用与实装相同的通信链路；仿真试验系统的硬件系统方面采用商用计算机、服务器等设备，其影响可暂时不予考虑；仿真试验系统的软件运行环境，主要有操作系统、数据库等；仿真运行支撑分系统。由于操作系统、数据库等的稳定性都相对较

好，对仿真试验可信性的影响很小，主要考虑仿真试验系统的运行支撑分系统的数据传输能力，如丢包率、时延、吞吐量等。

综合以上对某指挥信息系统情报处理仿真试验可信性影响因素的分析，对各因素进行层次分解划分，得出某指挥信息系统情报处理仿真试验可信性层次模型，如图5所示。

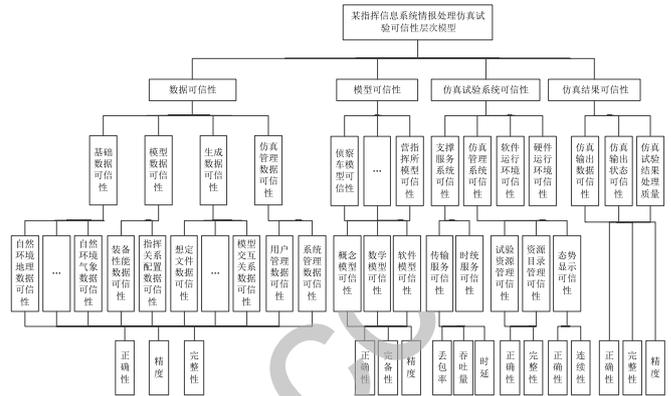


图5 XX指挥信息系统情报处理仿真试验可信性评估指标体系

Fig.5 The credibility evaluation index system of XX C4ISR system simulation test of information processing

3.2.2 单因素评判

单因素评判主要用于计算各原子因素的可信度分量。

(1)建立因素集与评判集

由图5可知，对某炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验可信性评估，其因素集如下：

$C=\{U1=数据可信性, U2=模型可信性, U3=仿真试验系统可信性, U4=仿真结果可信性\}$

$U1=\{U11=基础数据可信性, U12=模型数据可信性, U13=生成数据可信性, U14=仿真管理数据可信性\}$

.....

对于影响炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验可信性的各因素进行单因素评判，本文设定共用一个评判集 $V=\{V1, V2, V3, V4, V5\}$ ，包含五个等级，各等级的含义如表1所示。

表1 评判集的划分及其描述

Tab.1 The division and description of the judgement set

评价等级	V1	V2	V3	V4	V5
描述	完全满足要求	较满足要求	基本满足要求	较不满足要求	完全不能满足要求

(2)构造两两比较判断矩阵

两两比较判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ，其中 a_{ij} 为因素 u_i 与 u_j 对上一层父因素可信性影响的相对重要性比值，其大小通常采用1—9标度方法和指数标度法，各标度的含义如表2所示，指数标度法的指数取值参考文献[10]中的取值。

表2 指数标度和1—9标度及其具体含义

Tab.2 The method of index scale and 1—9 scale and its specific meaning

参数k	元素i相对于j的重要性	a_{ij}	
		1—9标度法	指数标度法
0	同样重要	1	1
1	稍微重要	3	1.27651
2			1.62948
3	明显重要	5	2.08005
4			2.6552
5			3.38939
6	强烈重要	7	4.32659
7			5.52293
8			7.05008
9	极端重要	9	9

1—9标度方法在用于确定事物的排序上基本合理、可靠，但用它得出的权值计算系数却往往不可靠。在理论上可以证明：指数标度法具有好的衡量标度。因此，在此采用指数标度法。首先还是由专家对评价指标各层上的元素进行分析，按照对上层元素的可信度影响大小的顺序，对同一层上的各元素进行排序。然后利用指数标度法给判断矩阵赋值。由于炮兵连指挥信息系统仿真试验可信性影响因素较多，这里仅对每一层元素给出其中的一个判断矩阵，见表3—表6。

表3 第一层指标判断矩阵C

Tab.3 The judgement matrix C of the first level index

U_i/U_j	U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	1	0.614	0.481	0.614
U_2	1.628	1	0.784	1.276
U_3	2.080	1.276	1	1.276
U_4	1.628	0.784	0.784	1

表4 第二层指标U1判断矩阵的指数标度

Tab.4 The judgement matrix C of the second level index

U_{1i}/U_{1j}	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}
U_{11}	1	0.377	0.614	1.276
U_{12}	2.654	1	1.628	1.628
U_{13}	1.628	0.614	1	1.276
U_{14}	0.784	0.614	0.784	1

表5 第三层指标U11判断矩阵的指数标度

Tab.5 The judgement matrix C of the third level index

U_{11i}/U_{11j}	U_{111}	U_{112}	U_{113}	U_{114}
U_{111}	1	1.628	2.654	2.080
U_{112}	0.614	1	1.276	1.276
U_{113}	0.377	0.784	1	1.276
U_{114}	0.481	0.784	0.784	1

表6 第四层指标U111判断矩阵的指数标度

Tab.6 The judgement matrix C of the fourth level index

U_{111i}/U_{111j}	U_{1111}	U_{1112}	U_{1113}
U_{1111}	1	2.6552	1.62948
U_{1112}	0.37662	1	0.61369
U_{1113}	0.61369	1.62948	1

从表中的调查结果可知，对于数据可信性的影响因素，较重要的是数据的正确性；对于模型的可信性影响，其正确性明显比分辨率和精度重要得多，保证模型可信性首先应提

高模型的正确性；对于仿真试验系统可信性而言，主要是支撑服务系统和仿真管理的影响，硬件运行环境和软件运行环境的影响很低；对于仿真结果可信性，主要是试验数据处理的正确性。

(3)计算相对权重向量

采用“和法”的特征向量近似计算方法，计算矩阵的特征向量，以D111的特征值计算过程为例：

$$D_{111} = \begin{bmatrix} 1 & 2.6552 & 1.62948 \\ 0.37662 & 1 & 0.61369 \\ 0.61369 & 1.62948 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{①列向量标准化}} \begin{bmatrix} 0.502434 & 0.502434 & 0.502434 \\ 0.189227 & 0.189226 & 0.189226 \\ 0.308339 & 0.308340 & 0.308340 \end{bmatrix}$$

$$\xrightarrow{\text{②按行求和}} \begin{bmatrix} 1.507302 \\ 0.567678 \\ 0.92502 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{③归一化}} \begin{bmatrix} 0.502434 \\ 0.189226 \\ 0.308340 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{④求对应特征根}}$$

$$\lambda_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{\omega_i} = \frac{1}{3} (2.999998 + 2.999998 + 2.999998) = 2.999998$$

求得的特征向量为 $[0.502, 0.189, 0.308]^T$ ， $CR = -0.000007/0.52 = -0.0000135 < 0.1$ ，满足一致性要求。

同理，可求得各指标判断矩阵的特征向量。

(4)计算单因素评判的可信度

应用专家打分法对基础地理信息数据的正确性、精度、完整性做出了评价，组合三个评价向量得到模糊评判关系矩阵如表7所示。

表7 基础地理信息数据可信性评判的模糊关系矩阵

Tab.7 Fuzzy relation matrix for evaluating the credibility of basic geographic information data

评判目标	评判因素及对应权重	模糊关系矩阵R				
		完全满足要求V1	较满足要求V2	基本满足要求V3	较不满足要求V4	完全不能满足要求V5
自然环境地理数据可信性	正确性(0.503)	0.2	0.5	0.2	0.1	0
	精度(0.189)	0.4	0.5	0.1	0	0
	完整性(0.308)	0.3	0.4	0.2	0.1	0

3.2.3 综合评判

(1)初级综合评判

为了突出关键因素，同时又兼顾其他因素，在自然环境地理数据可信性初级综合评判中采用主因素突出型算子 (\cdot, \vee) ，初级综合评判过程如下：

$$B = A^T \cdot R = \left(\bigvee_{i=1}^m a_i r_{ij}, j = 1, 2, \dots, 5 \right) = \max[a_1 r_{1j}, a_2 r_{2j}, \dots, a_m r_{mj}] \quad (j = 1, 2, \dots, 5)$$

$$= V(0.30146, 0.75365, 0.30146, 0.15073, 0) \xrightarrow{\text{归一化}} (0.2, 0.5, 0.2, 0.1, 0)$$

由上式可知，评判集V中的元素V2对应的隶属值最大，为0.5；按最大隶属度原则，该自然环境地理数据可信性的初级综合评判结果为“较满足要求”。

(2)高级综合评判

高级综合评判建立在初级综合评判的基础上。通过初级综合，我们已将原子因素的评判综合到上一层次；在高级综合评判中，把低一层的评判结果向量作为一个模糊向量，多个低层模糊向量的综合可构成高一层的模糊评判关系矩阵

R 。对该关系矩阵进行模糊合成运算,可求得高一层的综合评判值。

以数据可信性的第二层因素综合到第一层的模糊评判为例,说明高级综合评判方法的实现。自然环境地理数据可信性是第二层因素集的一个元素,其初级评判结果 $B=(0.2,0.5,0.2,0.1,0)$ 可作为第一层数据可信性评判的一个模糊评判向量。以同样的方法分别求出模型数据可信性、生成数据可信性、仿真管理数据可信性的模糊评判向量后,组合所有数据可信性的第二层因素评判向量构成模糊评判矩阵 R 。针对该矩阵同样选取主因素突出型算子 $\cdot(\cdot, \vee)$, 得到数据可信性最终的模糊评判向量 $B=A^T \cdot R=(0.4405,0.3524,0.1381,0.0690,0)$ 。根据最大隶属度原则,该数据可信性的最终评判结果为“VI”;若评判等级用“高”和“低”来描述,则表示具有“极高”的可信度。

4 结论(Conclusion)

最终结果表明,所评估的炮兵连指挥信息系统情报处理仿真试验具有极高的可信性,但需注意限制和约束条件。

通过模糊层次分析法的基本思想和原理,结合指挥信息系统仿真试验过程,对如何评估指挥信息系统仿真试验可信性做了一定的研究和探讨。通过应用模糊层次分析法评价模型,将定性和定量分析有机结合起来,尽量减少了个人主观臆断所带来的弊端,评价结果相对一般评打分等方法更客观,评价结果更可信。

参考文献(References)

- [1] Jian Bing Tang, Tian Tian Guo, Qi Gao Hu, et al. Research on the Credibility Evaluation Methods of Combat Simulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 713-715: 2139-2142.

- [2] Bing Li, Li Hong Li, Fan Ming Liu. Verification, Validation and Accreditation of Ship Electric Propulsion Simulation System[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 433-435: 1915-1920.
- [3] Jun Sun, Bei Ke Zhang, Chong Guang Wu. Life Cycle VV&A Simulation Modeling Process Based on Validation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 80-81: 511-515.
- [4] 谭亚新, 王立国, 杨学会, 等. 作战仿真可信性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 3-4.
- [5] 武小悦, 刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 40-52.
- [6] 左彩霞. 复杂全数字仿真系统的可信性评估方法的研究与应用[D]. 电子科技大学硕士学位论文, 2010.
- [7] 王石, 伍丁红, 瞿亮, 等. 复杂仿真系统可信度评估框架研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4): 116-122.
- [8] 孙世霞. 复杂大系统建模与仿真的可信性评估研究[D]. 国防科学技术大学研究生院学位论文, 2005.
- [9] 初剑锋, 张耀鸿, 陈亮. 基于模糊AHP法的炮兵指挥信息系统效能评估[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(6): 41-44.
- [10] 焦鹏, 查亚兵. 层次分析法在制导仿真系统可信度评估中的应用[J]. 计算机仿真, 2005, 22(9): 68-72.

作者简介:

- 蔡磊升(1980-), 男, 硕士, 工程师. 研究领域: 指控系统试验.
- 张晓娜(1981-), 女, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 软件测试.
- 门星火(1975-), 男, 硕士, 高级工程师. 研究领域: 系统建模与仿真.
- 刘波(1983-), 男, 本科, 工程师. 研究领域: 指控系统试验.

(上接第20页)

参考文献(References)

- [1] Chen T, Zhang W, Lu Q, et al. SVDFeature: a toolkit for feature-based collaborative filtering[J]. Journal of Machine Learning Research (JMLR), 2012, 13(1): 3619-3622.
- [2] Gantner Z, Rendle S, Freudenthaler C, et al. MyMediaLite: a free recommender system library[C]. ACM Conference on Recommender Systems (RecSys), 2011: 305-308.
- [3] Sadafale K, Sadafale K. An online recommendation system for e-commerce based on apache mahout framework[C]. Conference on Computers and People Research (SIGMIS-CPR), 2013: 153-158.
- [4] Koren Y. Factorization meets the neighborhood: a multifaceted collaborative filtering model[C]. ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (SIGKDD), 2008: 426-434.
- [5] 张著英, 黄龙玉, 王翰虎. 一个高效的KNN分类算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(3): 170-172.

- [6] Salakhutdinov R, Mnih A. Bayesian probabilistic matrix factorization using Markov chain Monte Carlo[C]. International Conference on Machine Learning (ICML), 2008: 880-887.
- [7] Lemire D, Maclachlan A. Slope One Predictors for Online Rating-Based Collaborative Filtering[J]. Computer Science, 2005: 21-23.
- [8] Yang Y, Liu X. A re-examination of text categorization methods[C]. In: Proceedings of ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR), 1999: 42-49.

作者简介:

- 林楠(1997-), 男, 本科生. 研究领域: 推荐系统.
- 杨文渊(1994-), 男, 本科生. 研究领域: 软件工程.
- 马伊莉(1997-), 女, 本科生. 研究领域: 前端开发.
- 朱婷婷(1997-), 女, 本科生. 研究领域: 前端开发.
- 陈圣磊(1977-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机器学习, 数据挖掘.