

基于支持向量机的装备技术准备能力预测算法

周文明^{1,4}, 陈军生¹, 宋吉星², 樊启辉³

(1. 国防大学军事后勤与军事科技装备教研部, 北京 100091;

2. 中国人民解放军 96265 部队, 河南 南阳 473139;

3. 中国人民解放军 73191 部队, 江苏 泰州 225315; 4. 后勤学院军训教研室, 北京 100039)

摘要: 高技术武器装备技术准备在装备保障中处于非常重要的地位。分析了技术准备的主要环节和要素, 给出了效能预测指标体系, 建立了基于支持向量机的装备技术准备能力预测算法模型, 给出了装备技术准备的保障效能预测实例。预测结果证明, 所提算法是一种有效的非线性处理方法, 建立在统计学习理论基础之上, 具有明显的泛化特性。所提算法为装备保障指挥决策和系统优化设计提供理论依据、技术支持和有效工具。

关键词: 支持向量机; 技术准备; 模式分类; 预测

中图分类号: E 926.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.09.17

Prediction algorithm for the support capability of armament technical preparation based on support vector machine

ZHOU Wen-ming^{1,4}, CHEN Jun-sheng¹, SONG Ji-xing², FAN Qi-hui³

(1. Department of Military Logistics and Armament, National Defence University of PLA, Beijing 100091, China;

2. Unit 96265 of the PLA, Nanyang 473139, China; 3. Unit 73191 of the PLA, Taizhou 225315, China;

4. Military Training Section, Logistics Institute, Beijing 100039, China)

Abstract: The technical preparation of high-tech armament is important in the equipment support. Key link and main influencing factors of the technical preparation are analyzed. The index system of efficiency evaluation is presented. The effective non-line method established on statistics and characteristics of generalization is verified. The command, decision making and system optimum design of armament technical preparation are strongly supported by the prediction algorithm.

Keywords: support vector machine (SVM); technical preparation; pattern classification; prediction

0 引言

装备技术准备是装备在使用前所进行的一系列技术活动的统称, 包括利用专用的设施、设备对其进行综合检查、测试、技术鉴定、加注燃料、充电、充气、组装配套、加装火工品及弹药、进行系统联调等工作^[1]。装备技术准备工作主要由装备技术保障机构完成, 这里专指承担装备技术准备任务职能的保障机构。随着精确制导武器、信息化作战平台的快速发展和大量装备, “先备后用”、“先测后修”, 装备技术准备已成为装备使用和装备保障一项必不可少的工作, 其地位和作用越来越重要。装备技术准备内容, 随装备类型、技术、性能和用途的差异而不同。

当前, 国内外对于装备保障特别是装备技术准备相关内容的研究较少, 大型作战模拟仿真系统, 如美国的联合战

区级模式系统(joint theater-level simulation, JTLS)^[2-3]和联合作战仿真系统(joint warfare system, JWARS)^[4]系统, 对装备保障的刻画和模拟也非常简单, 对装备技术准备相关环节的模拟还是空白, 不能体现信息化作战条件下装备技术准备的复杂性和规律性。在 JTLS 模拟系统中对于导弹发射任务中的技术准备, 只采用时间延迟来代替技术准备的复杂过程^[5]。由于支持向量机(support vector machine, SVM)是一种有效的非线性问题处理算法, 具有较强的泛化特性和分类识别精度, 被广泛应用于模式识别和分类评估^[6-7]。本文在分析某单位技术准备保障诸多要素、关键环节和主要行动过程基础上, 建立了基于 SVM 的装备技术准备能力预测算法, 并对某技术分队保障能力进行了实例应用研究, 验证本文算法的合理性和有效性, 为装备技术准备保障辅助决策和大型模拟系统的开发提供算法支持。

1 SVM 算法建模

建立在统计学习理论基础上的 SVM^[8],是解决非线性问题的有效工具,即使在较少的训练样本条件下,也能得到较强的泛化性能。大多数机器学习算法通常只考虑经验风险最小化(empirical risk minimization, ERM),而 SVM 依赖 VC(Vapnik-Chervonenkis)维理论来使结构风险最小化(structural risk minimization, SRM)。该方法将学习问题归结为凸二次规划(quadratic programming, QP)问题,很好地克服了网络设计过程中隐层节点数难以确定,以及学习过程中的过拟和问题和局部极小值问题。SVM 的主要思想是:用非线性函数把输入变量 x 映射到某个高维特征空间 H ,然后在 H 中构造(广义)最优超平面,实现数据在高维空间中的线性可分。SVM 通过引入核函数,精巧地解决了“维数灾难”的问题,从而有效地避免了样本维数对算法复杂度的直接影响。

1.1 SVM 的理论基础

假设一个训练样本数据集集合 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^l$,其中, $x_i \in R^n$; $y_i \in \{\pm 1\}; i=1, 2, \dots, l$ 。基于 SVM 分类器的构造算法实质上是一个最优化权参数的过程。所选择的最优参数值,目的是保证 SRM,同时满足分类超平面间的距离最大化。当训练集是线性可分时,存在序偶 (w, b) ,使得

$$w \cdot x_i + b \geq 1, \forall x_i \in A \tag{1}$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, \forall x_i \in B \tag{2}$$

式中, A, B 为分类结果集。最终得到分类器函数为

$$f_{w,b} = \text{sign}(w \cdot x + b) \tag{3}$$

归为优化问题

$$\begin{aligned} & \text{Max } \frac{1}{\|w\|} \text{ or } \text{Min } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ & \text{s. t. } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1, i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \tag{4}$$

构造式(5)的拉格朗日函数来求解。

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i [y_i(w \cdot x_i + b) - 1] \tag{5}$$

通过拉格朗日函数的鞍点给出优化问题的解。决策函数转化为

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i^* (x \cdot x_i) + b^*) \tag{6}$$

式中, $b^* = y_i - w^* \cdot x_i, w^* = \sum_{i=1}^l \alpha_i^* y_i x_i; \alpha_i^*$ 是对偶二次规划的最优解。

$$\begin{aligned} & \text{Max } F(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0, \alpha_i \geq 0 \end{aligned} \tag{7}$$

通过引入松弛变量集和惩罚因子来解决线性不可分情况,让松弛程度达到最小,解决广义的线性分类问题;通过把训练数据样本点 x 映射到某个特定的高维特征空间 $\phi(x)$,然后在这个高维特征空间执行线性分类来解决非线性问题,以获得优化问题的解。

$$\text{Max } F(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j [\phi(x_i) \cdot \phi(x_j)] \tag{8}$$

令 $K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \cdot \phi(x_j)$,则式(8)变为

$$\text{Max } F(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \tag{9}$$

决策函数转变为

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i^* K(x \cdot x_i) + b^*) \tag{10}$$

式中, $K(x \cdot x_i)$ 称为核函数。为了减少高维特征空间中求解优化问题计算量,可采用原样本空间中的核函数替换高维特征空间向量内积来实现。常用的有 3 种不同的核函数,形成 3 种不同的算法。常用核函数如下:

线性核函数,可表示为

$$K(x, x_i) = x^T x_i$$

多项式核函数,可表示为

$$K(x, x_i) = (\gamma x^T x_i + r)^\rho, \gamma > 0$$

径向基核函数,可表示为

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2), \gamma > 0$$

SVM 的训练归结为求解二次规划问题,选择该问题的最优解算法成为关键。本文采用文献[9]提出的序贯最小优化算法(sequential minimal optimization, SMO)。因为只有两个变量,通过等式,用其中一个表示出另一个,因此,可以通过解析方法求出迭代过程中每一 QP 子问题的最优解,避免了数值求解优化问题的复杂性。

1.2 SVM 多元分类决策模型的构建

SVM 是为二分类问题设计的,如何构建多元分类决策模型,有多种方法,如一对一(one against one),一对多(one against rest)。一对一方法需设计 $N(N-1)/2!$ 个分类器,一对多需设计 N 个分类器。本文将 SVM 同二叉决策树思想结合起来构造决策分类器^[10],这样只需 $N-1$ 个分类器,如图 1 所示。

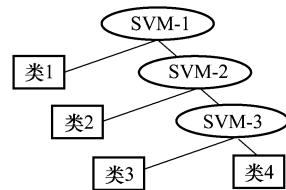


图 1 多分类器示意图

2 装备技术准备保障要素分析

导弹武器装备系统是一个多层次、多要素、多指标的复杂系统,导弹装备技术准备的各种保障要素、特征指标的数量很多,容易造成维数灾难。通常,指标体系的建立一般需要遵循系统性、客观性、完备性、可测性、独立性等原则。其中完备性原则要求对研究对象的剖析尽可能详细,但在复杂系统能力评估中也会造成一个很大的问题,即指标越来越

多,计算越来越复杂,模型的求解也变得越来越困难。虽然完备性是建立指标体系追求的目标之一,但如果主次不分,过分在细枝末节上纠缠不清,则是不可取的。本文通过分析技术准备保障的过程^[11-12],采用信息论中的相似压缩、奇点压缩等信息压缩原理来约简指标^[13],得到如图 2 所示的指标体系。

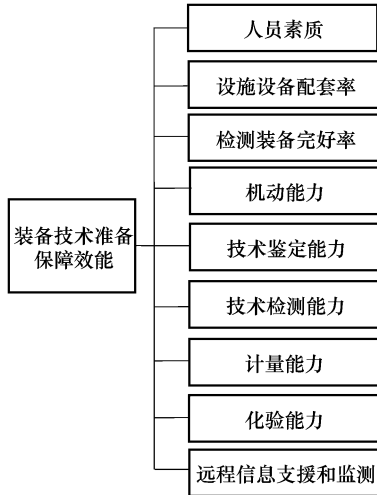


图 2 装备技术准备保障效能指标体系

3 指标的确定

根据确定的指标体系,分别采用 3 种方法确定各指标的值。

3.1 运筹分析方法

人的因素在各类装备技术准备保障任务中始终起着关键的作用,人的素质较高,能力较大,将是技术准备保障能力的倍增器。文献[5,14]中的方法,用 x_1 表示人员素质和能力。采用模糊综合评判^[15]的方法量化人员保障能力。

信息化水平指武器装备技术检测过程的实时动态监控能力、专家知识数据库的建设水平和指挥通信系统建设等,用 x_9 表示,通过模糊综合评判方法计算其指标值。

3.2 数学定义方法

定义 1 设施设备配套率是实编设施设备的数量与应编设施设备的数量之比。

$$x_2 = \begin{cases} \frac{n_v}{n_w}, & n_v \leq n_w \\ 1, & n_v > n_w \end{cases} \quad (11)$$

式中, x_2 为设施设备配套率; n_v 为实编设施设备的数量; n_w 为应编设施设备的数量。

定义 2 检测装备完好率是指完好的检测装备数量与应编的数量之比。

$$x_3 = \begin{cases} \frac{n_1}{n_2}, & n_1 \leq n_2 \\ 1, & n_1 > n_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, x_3 为检测装备完好率; n_1 为完好的检测装备数量; n_2 为编制的检测装备数量。

由于设施设备机动能力很难用精确的数学表达式描述,因此设施设备机动能力是一个模糊型指标。记设施设备机动能力为 x_4 , x_4 与设施设备的机动性 m_1 、机动方式 m_2 、机动环境 m_3 、机动范围 m_4 和使用对象 m_5 有关。 $M_i(i=1,2,\dots,5)$ 的值一般由专家确定,则 x_4 可由式(13)确定。

$$x_4 = \sum_{i=1}^5 a_i m_i \quad (13)$$

式中, a_i 为权重,且 $a_1 + a_2 + \dots + a_5 = 1$ 。

3.3 实际考核方法

根据相关部队的考核方法,相应给出技术鉴定能力 x_5 、技术检测能力 x_6 、计量能力 x_7 、化验能力 x_8 和信息支援与监测能力 x_9 ,这里不再赘述。

4 技术准备效能分级模式

采用德尔菲法建立保障效能预测评估分级决策模式,分别对 9 个单项指标进行分级评定和综合,按照性能优劣分为 4 级:保障效能优秀、良好、达标和不达标。具体模式参数指标区间阈值如表 1 所示。评定成绩按 1 000 分制,由于导弹武器技术性能要求高,检测效能类似于木桶效应,因此规定 9 个指标中,有一个指标不达标,即使其他指标值再高,综合效能也评定为不达标。

表 1 装备技术准备保障能力指标分级模式

综合效能指标	4 级决策模式			
	不达标	达标	良好	优秀
人员素质	[0 300]	[300 350]	[350 400]	[400 450]
设施设备配套率	[0 35]	[35 40]	[40 45]	[45 50]
检测装备完好率	[0 35]	[35 40]	[40 45]	[45 50]
机动能力	[0 35]	[35 40]	[40 45]	[45 50]
技术鉴定能力	[0 35]	[35 40]	[40 45]	[45 50]
技术检测能力	[0 85]	[85 90]	[90 95]	[95 100]
计量能力	[0 85]	[85 90]	[90 95]	[95 100]
化验能力	[0 85]	[85 90]	[90 95]	[95 100]
信息支援和监测	[0 35]	[35 40]	[40 45]	[45 50]

5 基于 SVM 的某技术分队技术准备保障效能预测

5.1 训练数据的获取与预处理

为了建立一个稳健的非线性 SVM 分类模型,在收集整理部队考核成绩的基础上,对数据作适当调整,得到 63 个样本值,其中,53 个样本作为训练样本用于建立分类模型,10 个样本作为测试样本用来检验模型分类的准确率,样本数据分别如表 2 和表 3 所示。为了直观地比较各样本值之间的差异,给出了模型训练数据可视化图,如图 3 所示。

表 2 模型训练样本值

样本	指标								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	280	33	34	32	35	84	82	83	33
2	260	35	37	36	38	87	86	85	35
3	275	36	38	38	36	88	87	86	40
4	320	30	36	37	39	86	91	86	38
5	350	29	41	43	38	88	90	87	40
6	370	37	31	39	37	89	88	89	37
7	330	40	29	38	39	88	85	90	36
8	340	45	31	39	40	87	86	85	38
9	300	39	35	28	36	85	89	91	33
10	310	35	33	30	44	89	83	85	37
11	400	36	37	38	39	90	79	86	36
12	395	35	37	39	37	95	77	87	40
13	320	36	38	35	36	88	85	81	35
14	315	37	35	36	39	85	86	82	38
15	312	38	36	37	38	35	85	83	36
16	320	37	36	35	37	87	86	86	37
17	330	35	38	36	35	86	87	88	36
18	335	36	35	36	38	87	88	87	38
19	345	37	37	37	36	88	87	89	36
20	333	38	36	38	39	89	89	87	39
21	310	39	39	37	38	88	85	88	37
22	315	38	36	39	36	85	88	85	38
23	305	35	35	39	36	87	87	86	36
24	301	36	36	37	38	86	86	86	37
25	300	37	37	36	39	87	87	87	38
26	320	37	36	35	37	87	86	86	37
27	330	35	38	36	35	86	87	88	36
28	335	36	35	36	38	87	88	87	38
29	345	37	37	37	36	88	87	89	36
30	333	38	36	38	39	89	89	87	39
31	310	39	39	37	38	88	85	88	37
32	315	38	36	39	36	85	88	85	38
33	360	42	42	41	44	93	92	93	43
34	350	43	44	40	41	91	93	93	41
35	355	41	40	42	42	95	91	92	42
36	360	40	41	41	41	94	94	91	43
37	365	42	42	43	43	93	93	93	41
38	370	43	40	44	42	92	92	92	40
39	370	44	43	42	44	91	91	91	41
40	390	43	44	43	43	93	93	94	42
41	385	42	41	44	41	94	92	93	43
42	387	41	42	41	42	93	94	91	42
43	420	47	46	46	47	97	96	97	47
44	410	46	47	49	48	96	98	96	46
45	425	47	49	48	49	98	97	98	48
46	430	48	48	47	46	97	98	97	49
47	440	49	47	46	48	96	97	98	48
48	445	45	46	48	47	95	99	96	47
49	446	47	45	47	45	95	98	99	46
50	436	48	47	46	48	96	95	97	48
51	435	49	48	48	49	97	96	96	47
52	441	50	47	49	50	98	97	95	45
53	448	48	46	47	47	99	96	96	46

表 3 测试样本值

样本	指标								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	270	38	35	38	36	85	86	87	35
2	280	37	36	36	36	85	87	88	37
3	276	40	37	35	37	86	85	86	38
4	400	35	36	36	35	87	81	88	37
5	310	36	38	37	38	88	80	89	36
6	300	35	33	32	40	86	89	86	36
7	370	43	45	44	49	95	94	93	44
8	320	35	39	38	39	88	89	90	37
9	400	39	39	39	41	89	90	88	39
10	430	47	48	49	49	98	98	97	48

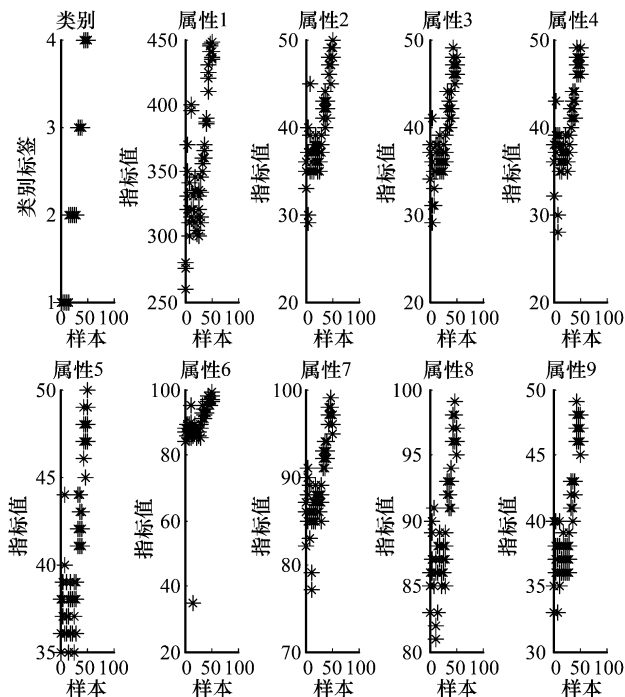


图 3 模型训练数据分维可视化图

图 3 中,属性 1~属性 9 分别对应人员素质、设施设备配套率、检测装备完好率、机动能力、技术鉴定能力、技术检测能力、计量能力、化验能力、远程信息支援和监测。

为了消除各维数据间数据级差别,避免因输入输出数据数量级差别较大而造成网络预测误差较大,这里对数据进行归一化处理,把所有数据都转化为 $[0, 1]$ 之间的数。归一化方法有最大最小法、平均数方差法及其他方法,这里采用最大最小法,归一化映射为

$$f: x \rightarrow y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

式中, $x, y \in \mathbf{R}^n$; $x_{\min} = \min(x)$; $x_{\max} = \max(x)$ 。

5.2 装备技术准备效能预测实现过程

(1) 最优统计学习决策超平面。采用本文提出的 SMO 对 4 类决策模式进行训练,得到最优决策超平面。本文选取具有明显统计特征的径向基核函数为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (15)$$

利用 53 个训练样本数据(见表 2)输入机器学习,建立分类预测决策模型。

(2) 分类决策。将预测样本数据(见表 3)输入已建立好的决策模型进行分类预测,得到如图 4 所示的分类结果。从图 4 可见,预测 10 个样本,只有第 9 个样本错误分类,准确率达 90%。

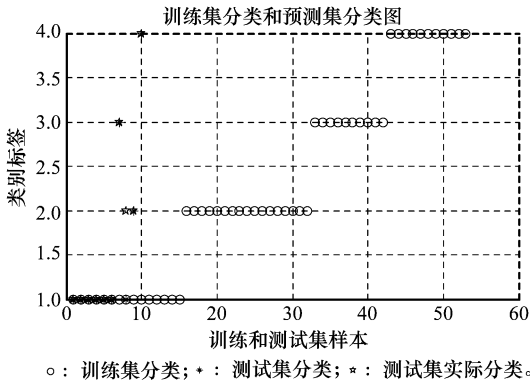


图 4 训练集分类和预测集分类图

5.3 结果分析

从实例预测结果来看,本文建立的预测算法具有较高的预测准确率,同时泛化能力较强,对于预测样本 1~样本 3,人员素质不达标,其他指标分值再高,也确定为不达标。同样,样本 4 和样本 5,计量能力不达标,其他指标分值再高,同样定为不达标。这同实际上的要求,即木桶效应是一致的。另外,测试样本 8 未能正确分类,从训练样本数据分析,应该是训练样本数量显得有些不足,测试样本也不是太多,如果增加训练样本数量,尤其是达标数据范围的数据样本数量,预测正确率还会相应提高。

6 结论

本文建立的基于 SVM 的装备技术准备保障效能预测算法,不仅具有较强的泛化特性,而且具有较高的模式预测分类精度,能够较准确地预测技术保障分队的武器装备技术准备效能,为参加演练的装备指挥员提供有效的决策算法和训练工具。

参考文献:

[1] Jiang Y Q. *Military equipment support* [M]. Beijing: Chinese Encyclopaedia Publishing House, 2007. (蒋跃庆. 军事装备保障[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2007.)

[2] George F S, Gregory A M. The joint warfare system (JWARS): a modeling and analysis tool for the defense department [C] // *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2001: 78-99.

[3] Chen J S, Zhou W M. Hybrid evaluating method for support capability of armament distribution [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(11): 2453-2457. (陈军生, 周文明. 装备调配保障能力评估混合算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011,

33(11): 2453-2457.)

[4] Liu L, Xu H J, Guo H. Research on assessment model for effectiveness of advanced air fight base on LS-SVM [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 39(23): 36-42. (刘凌, 徐浩军, 郭辉. 基于 LS-SVM 的现代战斗机空战效能评估模型研究[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(23): 36-42.)

[5] Guo F, Wang S Y, Lun H C. Application of v-SVC classification algorithm in aircraft operational effectiveness estimation [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(2): 38-40. (郭风, 王思源, 伦洪昌. v-SVC 分类算法在飞机作战效能评估中的应用[J]. 光电与控制, 2007, 14(2): 38-40.)

[6] Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation* [M]. Ye S W, Shi Z Z, trans. Beijing: China Machine Press, 2004. (海金. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 史忠植, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.)

[7] Platt J C. Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines [M] // Schölkopf B, Burges C J C, Smola A J. *Advances in kernel methods-support vector learning*. Cambridge: MIT Press, 1999.

[8] Fu Y G, Shen R M. Learning effect evaluation system based on support vector machine [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(8): 15-16, 74. (付永钢, 申瑞民. 基于支持向量机的学习评价系统[J]. 计算机工程, 2004, 30(8): 15-16, 74.)

[9] Cui J J. *Missile measuring and testing technique* [M]. Beijing: National Defense Industrial publishing House, 1999. (崔吉俊. 火箭导弹测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.)

[10] Yu G D, Zhao L S. *Science of military equipment* [M]. Beijing: National Defense University Publishing House, 2000. (余高达, 赵璐生. 军事装备学[M]. 北京: 国防大学出版社, 2000.)

[11] Chen Y S. Simple in complex and certainty in uncertainty [EB/OL]. <http://survivor99.com/entropy/chen/chen21.htm>. (陈雨思. 复杂中的简单与不确定中的确定[EB/OL]. <http://survivor99.com/entropy/chen/chen21.htm>.)

[12] Ren H Q. *Science of military command decision* [M]. Beijing: National Defence University Publishing House, 2007. (任海泉. 军队指挥学[M]. 北京: 国防大学出版社, 2007.)

[13] Shi H P, Han T. Evaluation in support ability of equipment maintenance personnel based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Modern Electronics Technology*, 2008, 246(1): 96-98. (时和平, 韩桃. 基于模糊综合评判方法的装备维修人员保障能力评估[J]. 现代电子技术, 2008, 246(1): 96-98.)

作者简介:

周文明(1970-),男,工程师,博士,主要研究方向为信号处理、模式识别和战争模拟。
E-mail:zwmedu@163.com

陈军生(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为军事装备学。
E-mail:Chenjisedu@163.com

宋吉星(1969-),男,工程师,主要研究方向为电子对抗。
E-mail:songjixing678@163.com

樊启辉(1971-),男,工程师,主要研究方向为装备指挥研究。
E-mail:tzfanqihui@sina.com