

武器装备系统效能评估方法研究

郭业波¹, 曾博韬¹, 郭贤生^{1,2}

(1. 电子科技大学, 成都 611731; 2. 留学人员芜湖创业园, 芜湖 241006)

摘要: 系统效能是指在规定时间和条件下, 满足特定任务要求的程度。目前许多机构对系统效能评估方法展开了深入研究, 并取得了一定的研究成果。在简要介绍系统效能评估的基础上, 重点综述了几种经典的和一些新兴的系统效能评估方法, 如层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process)、ADC (Availability Dependability Capacity) 分析法、系统效能分析法 SEA (System Effectiveness Analysis) 和支持向量机评估法; 阐述的内容包括方法的基本思想、主要步骤、应用场景、研究进展及其相应的改进, 分析了每种方法的优势与不足, 以及应用中需注意的问题, 对后期如何进行效能评估以及采用何种效能评估方法具有一定的指导作用。

关键词: 系统效能; 层次分析法; ADC 分析法; 系统效能分析法 SEA; 支持向量机评估法

中图分类号: N945.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2017) 03-0061-10

Research of Weapons Equipment Systems Effectiveness Evaluation Methods

GUO Ye-bo¹, ZENG Bo-tao¹, GUO Xian-sheng^{1,2}

(1. University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China;
2. Wuhu Overseas Students Pioneer Park, Wuhu 241006, China)

Abstract: System efficiency is the satisfaction degree of special task in some defined conditions. Nowadays there are many organizations engaged in the research of system efficiency evaluation, and they have obtained certain research results. Based on the brief introduction, several classic system effectiveness evaluation methods were reviewed, such as: Analytic Hierarchy Process (AHP), the ADC Analysis, System Efficiency Analysis SEA and Support vector machine evaluation, including the basic idea of the methods, the main steps, application scenarios, and corresponding improvements. Analyses cover the advantages and disadvantages of each method, as well as the applications problems. This work helps to evaluate the effectiveness and how to evaluate the effectiveness of the method.

Key words: System Effectiveness; Analytic Hierarchy Process; ADC analysis; System efficiency Analysis SEA; Support vector machine evaluation

1 系统效能评估概述

1.1 效能的概念和定义

“效能”最基本的解释为: 完成系统最终目标

的程度, 或系统期望达到一组具体任务要求的程度。它是针对武器系统评价需要提出来的, 目前尚无统一明确的定义, 但是关于系统效能分析和研究的书籍有很多, 美国《陆军武器系统作战效

能分析》对系统进行效能分析具有重要的指导意义^[1]。

系统效能指的是系统在指定条件下完成指定使用目标的能力。这里“指定条件”指的是使用此系统的人员、时间和此系统当前本身所处的环境条件等因素，“指定使用目标”指的是系统所要完成的指定的任务，“能力”指完成指定任务的定量或定性程度的度量。

1.2 效能的分类

不同的研究人员对系统的理解不同，出于不同的研究目的，站在不同的层次，因此对效能有着不同的理解和定义。按照研究对象的不同来划分，可以将效能划分为武器系统效能和作战行动效能^[2]两部分，这两部分效能又可以进一步细分，如图1所示。

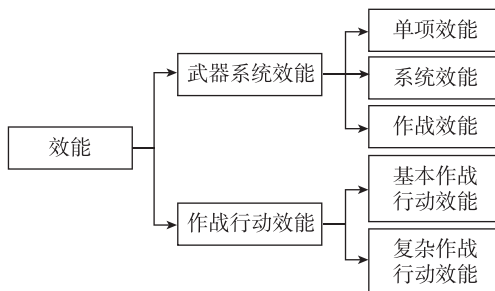


图1 效能分类

Fig. 1 The classification of efficiency

1) 单项效能：指的是武器装备系统针对单一目标完成某一指定任务的能力。比如预警雷达系统的探测效能、抗干扰效能、跟踪效能等。

2) 系统效能：是指在特定的场景下，武器装备系统完成指定任务的能力，系统效能可以理解为是对武器系统效能的综合评估，如预警雷达系统的系统效能就是探测效能、抗干扰效能、跟踪效能等单项效能的综合评价。

3) 作战效能：主要考虑人为因素和敌方对抗等因素的影响，这是它区别于系统效能的最根本原因，因此作战效能可以理解为系统参与到特定作战环境中，武器装备系统、人和其他系统相结合，达到规定作战任务的能力。

4) 作战行动效能：基于武器系统效能而高于其效能，其中复杂作战行动效能又是基本作战行动效能的有机综合。武器系统作战效能主要考虑武器本身具有的能力以及在作战中所起的作用，作战行动效能则从作战目的出发，更强调运用武

器装备的军事力量执行作战任务的效果，关注点是要完成的任务，使命要素更加明确。由于作战过程本身具有不确定性，因此作战行动效能更加动态。

本文主要讨论武器装备系统效能，美国工业界武器系统效能咨询委员会将其定义为“系统效能是指一个系统，在某一特定的作战场景下，完成规定任务的能力的度量，是系统的可用性、可信性和固有能力的函数”。例如传统的ADC效能分析法就是从系统的可用性、可行性和固有能力这三个方面加以阐述，这是描述系统效能的最常用方式，它将系统的可靠性、维修性等因素归为系统的可用性，任务的可靠性、可修复性等因素归为系统的可信性，射程、杀伤力等因素归为系统的能力。因此采用ADC效能分析法，最终的系统效能可由系统的可用性、可信性和能力三项指标综合得出^[3]，具体如图2所示。

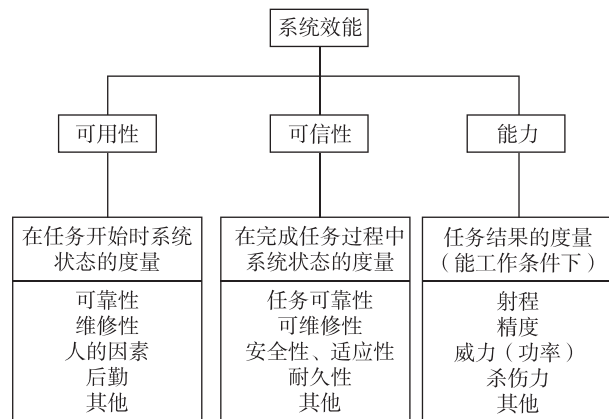


图2 系统效能

Fig. 2 System effectiveness

1.3 系统效能评估基本步骤

系统效能评估主要包括以下3个基本步骤：

- 1) 确定整个系统包含哪些评估指标体系；
- 2) 对系统评估指标体系进行正确合理的量化；
- 3) 对单个效能指标值进行综合。

1.4 系统效能评估方法的分类

目前用于系统效能评估的方法层出不穷，大体上主要分为：专家评估法、解析法、作战模拟法和其他方法，如图3所示。

1) 专家评估法：对于一些难以定量描述的系统，其指标效能值不易进行量化，只能通过专家经验、专家打分和一些先验信息等途径进行评估，如专家打分法、模糊综合评判法、群体多属性决

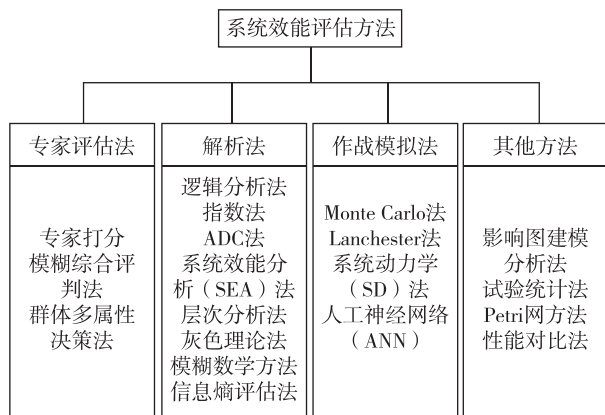


图 3 系统效能评估方法的分类

Fig. 3 The classification of system effectiveness evaluation method

策法等，此类方法通过经验、专家等途径进行评估，受主观因素影响较大。因此可以采用定性与定量相结合的评估方法，解决传统的专家评估法受主观因素影响较大的缺点，是目前比较常用的效能评估方法，如模糊综合评判法、聚类分析法、灰色关联分析法等。

2) 解析法：此方法主要是根据系统给定的条件与效能指标之间的函数关系建立相应的数学模型，然后用此模型来计算各指标的效能值，该方法思路简单明了、便于计算、能处理许多用传统的优化技术无法着手的实际问题。因此在实际的效能评估方法中得到了广泛应用，是目前各系统效能评估研究中最常用也是最实用的方法。此类方法有 ADC 法、系统效能分析 (SEA) 法、层次分析 (AHP) 法、逻辑分析方法、指数法、灰色理论方法、模糊数学方法、信息熵评估法等^[4]。

3) 作战模拟法：从现代意义的角度看，作战模拟法通常又称为作战仿真，是指通过建立现实军事系统的模型，然后借助计算机手段，通过仿真试验，收集作战过程的数据，通过分析和处理收集到的数据最终得到效能指标估计值。目前美国将作战模拟法应用于系统进行效能评估取得了重要的进展^[5-6]，我国的作战仿真不论是在理论研究还是在工程实践应用方面都取得了不错的成就。此方法对作战环境的模拟比较困难，仿真模型的构建本身就是一个复杂的系统工程，因此该方法在实际中并没有得到广泛的应用。神经网络 (ANN)、系统动力学 (SD) 法、Monte Carlo 法、Lanchester 法等都属于这类方法。

4) 其他方法：如试验统计法，是以经典的概率论与数理统计为理论基础，根据系统实战、演

习、试验获取的大量统计资料来评估系统的效能指标值。应用此类方法的前提是获取的试验数据的随机特性可以用模型清晰地表示出来，并被加以利用^[7-8]。该方法受主观因素影响较小，采用的评估理论都已比较成熟，可以用来验证其他方法的有效性。

伴随着其他学科的发展，如今人们将热学、力学等学科领域的理论应用到效能评估方法中来，在传统的效能评估方法的基础之上，出现了许多新兴的效能评估方法，如支持向量机评估法^[9-10]、探索性分析法、价值中心法、控制论法、数据挖掘等方法。

2 经典的系统效能评估方法

系统效能评估的方法多种多样，但是目前解析法是系统效能评估研究中最实用也是最常用方法，接下来主要分析解析法中几个具有代表性的方法，如系统效能分析法 SEA、ADC 法、层次分析法以及专家评估法中的模糊综合评判法和新兴的支持向量机评估法。主要从方法的基本思想、主要步骤、应用难点、应用与改进等方面加以阐述。

2.1 系统效能评估的 SEA 方法

2.1.1 基本思想

SEA (System Effectiveness Analysis) 方法是美国麻省理工学院信息与决策系统实验室 (简称 MIT-LIDS) 提出的系统效能分析方法，这是一种动态的评估方法^[11]。此方法的核心思想是确定两个属性空间：一个是由系统原始参数映射的系统属性空间，另一个是由使命原始参数映射的使命属性空间。这些属性是描述系统任务与环境参数的函数，对系统能力和使命要求在相同的使命空间进行相互比较，由此就可以计算出系统的效能值。

使用 SEA 方法进行效能评估之前，需要确定系统的几个基本概念：系统、使命、域、本元、属性、有效性指标^[12]，这些概念的含义如表 1 所示。

表 1 SEA 方法的基本概念

Tab. 1 The basic concepts of SEA method

概念	含义
系统	能够完成一种或者几种功能的由部件、部件的互连按照一定的次序组合在一起的结构
使命	一组用户分配的目标和任务，对使命的描述应尽可能清晰，以便构造出解析模型

续表

概念	含义
域	是使命存在和系统操作的环境, 表示一组条件或假设, 与系统有关但不属于系统的资源组成
本元	描述系统及使命的变量和参数
属性	描述系统特性或使命要求的量。也可称为性能量度 MOP (Measure of Performance), 在一个多使命的系统中, 性能量度是一个集合
有效性指标	MOE (Measures of Effectiveness), 是从系统属性与使命属性比较得到的量, 反映了系统与使命的匹配程度, 即系统效能

2.1.2 主要步骤

SEA 方法框架结构如图 4 所示。SEA 方法的基本分析步骤是:

- 1) 确定系统的环境和系统使命。
- 2) 根据系统使命映射出一组性能量度 $\{MOP_i\}$ 。
- 3) 根据系统在环境中的运动规律, 建立系统原始参数 $\{X_i\}$ 到性能量度的映射 f_s , 即

$$\{MOP_i\}_s = f_s(X_1, \dots, X_k) \quad (1)$$

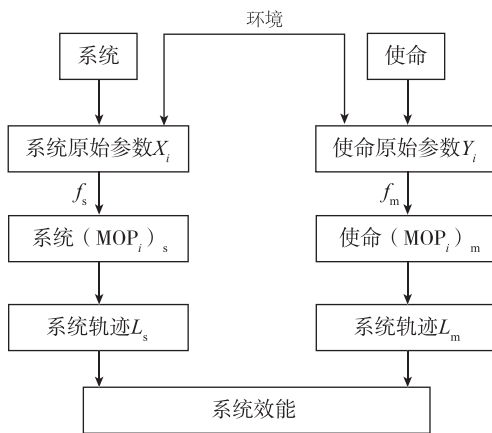


图 4 SEA 方法框架结构图

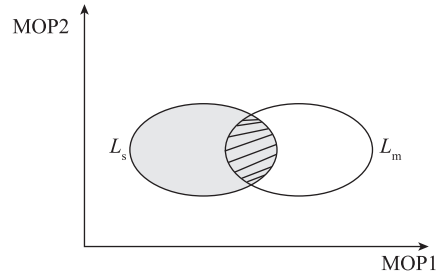
Fig. 4 The framework structure of SEA method

- 4) 根据系统使命要求, 建立使命原始参数 $\{Y_i\}$ 到性能量度的映射 f_m , 即

$$\{MOP_i\}_m = f_m(Y_1, \dots, Y_n) \quad (2)$$

- 5) 由式 (1) 可以在性能量度 $\{MOP_i\}$ 的维度上找到一个点, 这个点对应于系统原始参数 $\{X_i\}$ 的一组特定值, 这个值代表系统的一个可能状态。由于系统在运行的过程中, 系统原始参数在不断地变化, 就可在性能量度 $\{MOP_i\}$ 空间上形成一条运动轨迹叫做系统轨迹 L_s , 同理使命原始参数 $\{Y_i\}$ 的取值一般也会随着系统的运行有一个变化范围。由式 (2) 可在性能量度空间上产生相应的使命轨迹 L_m , 系统轨迹 L_s 和使命轨迹 L_m

通常都是“域”^[13], 如图 5 所示。

图 5 (MOP1, MOP2) 空间上的 L_s, L_m Fig. 5 L_s, L_m on the space of (MOP1, MOP2)

6) 系统在运行的过程中, 系统将会以一个不确定的概率落入某一个系统状态, 因此, 系统运行状态集就描述了系统完成某一任务的概率大小, 也就反映了系统完成任务的可能性, 这就是系统的效能。因此, 系统效能指标 E 的计算可通过如下表达式确定。

令性能量度 $\{MOP_i\}$ 空间系统轨迹 L_s 上的点的概率密度函数为 $h(s)$, 则

$$E = \int_{L_s \cap L_m} h(s) ds \quad (3)$$

特别地, 当系统轨迹 L_s 上的点满足均匀分布规律时, 即 $h(s) = \frac{1}{V(L_s)}$, 其中 V 表示 $\{MOP_i\}$ 性能量度空间上的测度。若 $\{MOP_i\}$ 空间为一维空间, 则 V 为长度; 若 $\{MOP_i\}$ 空间为二维平面空间, 则 V 为面积; 若 $\{MOP_i\}$ 空间为三维立体空间, 则 V 为体积。则

$$E = \frac{V(L_s \cap L_m)}{V(L_s)} \quad (4)$$

由上述定义的表达式可知, 系统效能 E 的取值范围为 $[0, 1]$, 如果

$$L_s \cap L_m = \Phi (\text{空集}) \quad (5)$$

它表示系统的所有运行状态均不能完成指定任务, 由式 (3)、式 (4) 可知系统效能 $E = 0$, 如果

$$L_s \cap L_m = L_s \quad (6)$$

它表示系统的所有运行状态都能完成用户分配的目标和任务, 此时系统效能 $E = 1$ 。

2.1.3 应用难点

在此仅提供了使用 SEA 进行系统效能评估的一个过程, 在实际的系统效能建模中, 还需要根据具体的使命任务要求、具体的系统及相应的环境进行分析。应用此方法的主要难点在于: 1) 如何选择合适的、与系统使命任务要求贴近的性能量度 MOP; 2) 选好性能量度空间之后, 如何建

立系统原始参数和使命原始参数到性能量度空间的映射 f_s 和 f_m ；3) 如何计算多维 $\{MOP_i\}$ 的系统效能指标^[14-17]。

1) 性能量度的选择：必须跟系统的具体使命任务要求相关。比如某一弹道导弹防御系统在一次战斗中的使命任务要求是“有效地指挥我方导弹把来袭目标摧毁在一定距离之外”，这个使命就包含了两个任务要求，即交战取胜和摧毁来袭目标。这样就必须采用一定的数学技巧，对上面的两个使命任务建立相应的性能量度 MOP 进行度量。

2) 系统映射的建立：这一过程需要借助相应的量化方法，在系统执行任务的过程中，把系统的组成结构、性能参数等对性能量度 MOP 的影响通过某一表达式描述出来，这一表达式就体现了它们对系统完成使命的作用。此系统映射建模的质量对后期系统效能分析具有重要的影响，它直接关系到由此得到的效能分析是否具有客观性和逼真性。

2.2 系统效能评估的 ADC 方法

2.2.1 基本思想

ADC 模型认为：“系统效能是预期一个系统在满足特定条件下，完成一组特定使命任务要求程度的量度。”它可以表示成系统的可用性、可信性与固有能力的函数。因此，用可用性向量 \mathbf{A} 表示系统在执使命任务之前它所处的所有可能的状态；用可信性矩阵 \mathbf{D} 描述系统在执行任务期间，由状态 i 转移到状态 j 的状态转移概率；用能力向量 \mathbf{C} 表征系统的固有能力的。于是系统效能就可以表示为可用性向量 \mathbf{A} 、可信性矩阵 \mathbf{D} 、能力向量 \mathbf{C} 三者的乘积^[18-20]，即 $\mathbf{E} = \mathbf{ADC}$ 。

2.2.2 主要步骤

(1) 确定可用度向量 \mathbf{A}

$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，式中 a_i 表示系统在执行任务之前初始状态，处于第 i 种状态的概率。

其中，

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

(2) 确定可信度矩阵 \mathbf{D}

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \dots & d_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式 (7) 中， $d_{i,j}$ 表示系统在执行任务过程中，系统由第 i 状态转移到第 j 状态的状态转移概率，且满足 $\sum_{j=1}^n d_{i,j} = 1$ 。

(3) 确定能力向量 (矩阵)

若仅对系统中的某一项效能值进行评估，则 \mathbf{C} 仅为一向量；若要对该系统的若干 (如 m) 项能力指标值进行评估，则 \mathbf{C} 为 $n \times m$ 维的矩阵。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,m} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n,1} & c_{n,2} & \dots & c_{n,m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) 中， $c_{i,j}$ 表示系统的第 j 项能力指标在第 i 种状态下完成任务的度量。 $c_{i,j}$ 的值可以通过相应的量化方法或者运算模型来计算。

(4) 计算系统效能 \mathbf{E}

$$\mathbf{E} = \mathbf{ADC} = (e_1, e_2, \dots, e_m) \quad (9)$$

根据可用度向量 \mathbf{A} 、可信度矩阵 \mathbf{D} 、能力向量 \mathbf{C} 三者之间的乘积，最终得出的系统效能为一向量。可以直接用此向量作为系统效能的评估结果，或者以此向量作为参考来对系统的 m 个能力向量评分，得到每个能力向量的权重大小，按照权重大小进行排序，得出最终的系统效能值。

2.2.3 应用难点

通过对 ADC 方法的基本思想和主要步骤的阐述可知，应用此方法的主要难点在于：

1) 系统初始状态的确定。采用 ADC 方法进行效能评估之前，首先需要确定系统的初始工作状态，对那些比较简单的系统 (系统只有工作和故障两种状态) 而言，采用 ADC 分析法具有一定的优势。但是如果某个系统由 m 个子系统组成，并且每个子系统不止工作和故障两种状态，假设有 n 种状态，则这个系统的初始状态数量为 n^m ，当系统比较复杂时，这个数量就相当惊人，这样会大大增加计算量。

2) 系统底层指标计算。主要体现在系统可用性和可信性的计算，但是系统的可用性、可信性主要通过状态转移概率来描述，因此最终体现在状态转移概率的计算上。一个系统的可靠性、可修复性、保障性在一定程度上决定了系统的可用性和可信性，特别是可信性计算与系统结构息息相关。当系统组合状态数 n 增加时，其状态转移概率的计算就会变得非常复杂，这也就限制了

ADC方法发展,即它只适用于一些简单的系统,对复杂的、组合状态比较多的系统就显得有点力不从心。

3) 系统能力的聚合。复杂的系统的能力指标体系往往是网状结构的,此时,传统的AHP方法就不再适用,必须采用一些能够反映网络特性的方法,如人工神经网络(ANN)方法、ANP方法^[21]等。

2.2.4 应用与改进

虽然ADC分析法具有一定的局限,但是对于一些比较简单的系统,应用此方法进行效能评估有一定优势。因此ADC分析法在简单系统效能评估中得到了广泛应用,在理论及相应的实践中得到了推广^[22-23],针对不同系统的不同情况给出了很多的修正方法,例如QADC方法、KADC方法^[24]。

2.3 系统效能评估的AHP方法

2.3.1 基本思想

层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP法)是美国匹兹堡大学运筹学专家Saaty于20世纪70年代提出的一种系统分析方法^[25]。该方法把定性和定量结合起来,将要研究的系统进行逐层分解,得到多个组成因素,并根据各因素之间的隶属关系,将其层次化得到一个层次结构模型^[26],通过这个层次结构模型对各指标之间的重要性进行两两比较,最后获得底层指标层相对于目标层的重要性权值。该方法可以用来解决一些复杂的、非结构化的问题,它的实用性及有效性使其在军事、能源分配和医疗等多个领域得到广泛的应用^[27-28]。杨智等^[29]运用改进层次分析法对雷达网的探测效能进行加权综合评估。通过实例验证了该方法的正确性和有效性。

2.3.2 主要步骤

AHP法的分析大体可分为以下4个步骤:

(1) 构建层次结构模型

对要进行评估的系统,首先分析系统中各评估指标之间的关系,然后将研究的系统从上到下划分为不同的层次,如目标层、准则层、指标层等^[30]。

(2) 构造判断矩阵

对同一层次中各指标之间的重要程度进行两两比较,可以通过一些先验信息或者通过专家打分,建立相应的专家知识库,最后通过表2的比较判断标度构造判断矩阵 \mathbf{A} ^[31]。

表2 比较判断标度

Tab. 2 The comparative judgment scale

比较判断标度	1	2	3	4	5
含义	同等 重要	稍微 重要	明显 重要	强烈 重要	极端 重要

(3) 计算指标权重

在第2步构造的判断矩阵的基础上,计算各指标之间的相对权重。可通过式(10)计算指标的权重:

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right) & (i=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 & (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (10)$$

式中, a_{ij} 为第*i*个指标相对于第*j*个指标的重要性。

(4) 进行一致性检验

最后对构造的判断矩阵 \mathbf{A} 进行一致性检验,如果构造的判断矩阵不满足一致性条件,那么就需要对原判断矩阵进行修正。判断矩阵的一致性主要通过一致性指标*CI*和一致性比率*CR*来进行度量,相应的计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - 1}{(n-1)RI} \quad (11)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j \right) / \omega_i \right] \quad (12)$$

式中, n 为判断矩阵 \mathbf{A} 的阶数, λ_{\max} 为判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值(主特征值、谱半径), RI 是与矩阵阶数对应的一个常数,称为平均随机一致性指标,可以通过查表3得到。当一致性比率 $CR < 0.1$ 时,则认为构造的判断矩阵 \mathbf{A} 一致性符合要求;否则,需要对原判断矩阵进行修正。

表3 RI 随*n*值的变化表

Tab. 3 The table of RI along with the change of n

n	1	2	3	4	5
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12
n	6	7	8	9	
RI	1.24	1.32	1.41	1.45	

如果构造的判断矩阵满足了一致性条件,那么可知各指标之间的权重为:

$$\omega = (\omega_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

2.3.3 应用难点与改进

虽然 AHP 法在解决某一类问题上具有独特的优势，但在系统效能评估问题上并不是万能的，存在一定的缺陷：主要在于构建层次结构模型上，对系统的复杂问题，如非线性、协同化等过分简化，构建的层次结构模型具有自顶向下、逐层传递的支配关系，因而无法反映指标层对目标层的反馈作用或者层次间各指标之间的相互影响。加上本身可能要进行评估的系统比较复杂，以及人的思维判断存在专业领域性、暂时模糊性等因素，导致决策专家在对实际系统各指标之间重要程度进行两两比较时，不可能始终保持判断的完全一致，判断存在一定的误差实难避免。因此不同的专家对同一个系统进行评估得出的判断矩阵往往不同。此方法的最大缺点就是受人的主观因素影响较大，方法的目的是在给定的方案中选择最优，而无法产生一个更好的新方案。

通过前面的分析可知 AHP 法的核心是：通过各层指标之间进行两两比较构造判断矩阵，关键在于构建的此判断矩阵是否满足一致性条件，因为它关系到由这个判断矩阵求得的权重向量是否具有真实性，因此，对判断矩阵一致性的改进是 AHP 中很重要的研究内容^[32-33]。李梅霞^[34]通过诱导矩阵和“和积法”对构造的不满足一致性条件的判断矩阵进行修正，分析了诱导矩阵与判断矩阵一致性之间的关系，提出了一种新的改进判断矩阵一致性的方法。

2.4 系统效能评估的模糊综合评判法

2.4.1 基本思想

模糊数学应用于系统效能评估最具代表性的方法是模糊综合评判，此方法最早由我国学者江培庄提出^[35]。此法数学模型简单、计算量小、容易被人们理解和掌握，因此在机械、矿业、核动力装置等诸多领域受到欢迎和重视。此方法的核心思想是：采用最大隶属度原则、模糊变换原理等原理，考虑与被评估系统的各个因素，对评估对象作综合评价。

在整个系统效能评估的过程中，对于很多指标无法进行准确的定量描述，因此对这些指标的评价具有一定的不确定性、模糊性等，而模糊综合评判法恰好可以有效地解决这类定性评价的指标，能够考虑影响所评判事物的模糊因素。因此

对于此类系统的效能评估具有一定的优势。

2.4.2 主要步骤

模糊综合评判法的主要步骤分为如下 3 步：

1) 定义评价等级集合，首先定义一组评价等级集合，如 {A、B、C、D、E} 依次对应 {优、良、中、一般、差}，然后组织多位专家进行打分，得到所有评价指标的一个矩阵。

2) 通过事先设定的隶属函数将所有指标的评价值转化为相应的隶属度、隶属度权重。

3) 采用模糊变换原则和最大隶属度原理对最终生成的隶属度权重矩阵进行运算，最后引入指标权重向量得到具体的评估结果。

隶属函数是用来刻画各指标评价值隶属于某评价等级集合的程度。在实际应用中可以采取多种方式求取隶属度函数，但是在对系统效能进行评估时，最常用的构造方式有如下 3 种，这也是应用最为广泛的，其函数图像如图 6 所示。

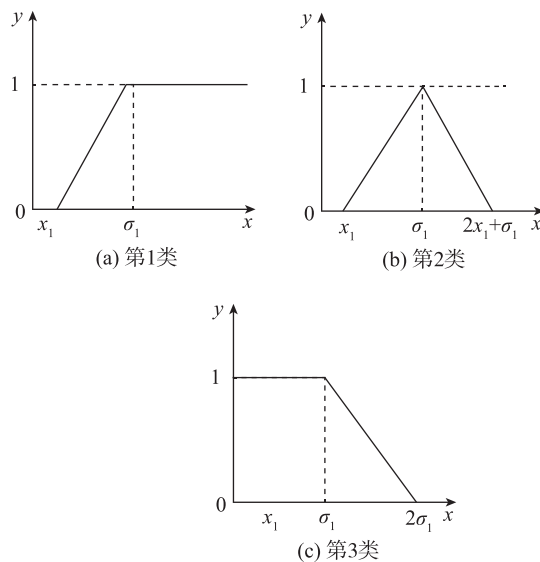


图 6 隶属函数

Fig. 6 Membership function

其中，第 1 类隶属函数的含义是当评价指标大于等于阈值 σ_1 时，认为其指标效能值为 1，主要用来刻画最高评价等级的隶属度；第 3 类隶属函数主要用于刻画越小越好型这类指标的效能值；第 2 类隶属函数用于刻画中间评价等级的隶属度^[3]。

图 6 中隶属函数的阈值 σ_1 对于不同的指标，可以不依赖于样本的数据，根据获取方式的不同将阈值 σ_1 分为客观阈值和相对阈值。客观阈值主要通过类比或经验获取，相对阈值主要是通过寻找最大、最小或中心值来获取。上

述隶属度的区间范围一般默认为 $2\sigma_1$ ，但在实际应用时，可以根据系统的具体情况进行相应的调整。模糊综合评判法首先定义一组评价等级集合，然后组织多位专家进行打分，因此该方法与 AHP 之间具有一定的联系，适用范围与 AHP 法基本相同，多用于一些大系统的、多属性的决策分析。

3 新兴的系统效能评估方法

目前传统的经典系统效能评估方法有很多，伴随着其他学科的发展，如今人们将热学、力学等学科领域的理论应用到效能评估方法中来，在传统的效能评估方法的基础之上，出现了许多新兴的效能评估方法如支持向量机评估法、探索性分析法、价值中心法、控制论法、博弈论法、数据挖掘等方法。

3.1 支持向量机评估法

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是 Vapnik 等于 1995 年首先提出的^[36]。该方法是一种有监督的统计学习方法，能最小化经验误差和最大化几何边缘，被称为最大间隔分类器。最初起源于对数据分类问题的处理上，后来由于其理论逐渐成熟，被用于效能评估方面的研究，并取得了一定的研究成果^[37]。其评估模型如图 7 所示。

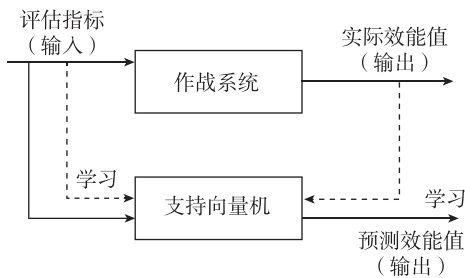


图 7 SVM 评估法的基本结构

Fig. 7 The basic structure of the SVM evaluation method

3.1.1 基本思想

将基于结构风险最小化的学习准则—支持向量机应用于系统效能评估中是一种比较新颖的效能评估方法，该方法基本不涉及复杂的计算问题，其基本思想是：将系统的评价指标作为输入变量，系统的实际效能值作为输出变量，然后将输入的评估指标通过支持向量机对已知效能指标数据进行学习，从而建立评估指标到实际效能值的非线性映射，然后输入一组新的评估指标变量，通过前面已经训练好的 SVM 模型做出相应的系统效能的输出预测，从而达到对系统效能评估的目的。

3.1.2 主要步骤

其主要步骤就是通过某种非线性映射 Φ ，将输入空间 X 的训练数据集 x 映射到某一高维线性空间 (Hilbert space) F 中，从而将输入空间 X 的非线性函数估计问题，转化为高维线性空间 F 中的线性函数估计问题，在空间 F 内做线性回归，然后再将回归结果通过逆映射 Φ^{-1} 返回输入空间 X ，最终便可获得训练数据 x 的回归结果 y 。

设某一待回归的数据集为 $T = \{x_i, y_i\}$ ， $(i = 1, 2, \dots, N)$ ， $x_i \in \mathbf{R}^n$ 为 n 维的系统输入向量， $y_i \in \mathbf{R}$ 为系统输出，则支持向量回归机的决策函数是非线性函数：

$$f(x) = \langle w \cdot \Phi(x) \rangle + b \quad (14)$$

式中， Φ 表示非线性映射； w 是权值，是映射函数的线性组合，反映了函数的复杂程度； b 是偏置量。通过对训练样本的学习，确定模型的相关参数，以使用函数 $f(x)$ 来推断任一输入 x 所对应的输出值 y ，从而建立基于 SVM 的系统作战效能评估模型。

式 (14) 中的 w 参数和 b 可通过使风险函数最小化来估计：

$$R(f) = \frac{1}{2} w^2 + C \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N L(f(x_i), y_i) \quad (15)$$

式中， L 为损失函数； C 为惩罚因子。 C 控制对超出 L 的样本的惩罚程度，对于损失函数 L ，本文采用 ϵ 不敏感损失函数作为结构最小化风险估计问题，引入松弛变量 ξ_i 、 ξ_i^* ，则用支持向量解决回归问题就转化为：

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} w^T \Phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i \\ y_i - w^T \Phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (16)$$

通过引入拉格朗日函数，可将式 (16) 等价转化为其对偶问题：

$$\begin{aligned} \max & -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) (\Phi^T(x_i) \Phi(x_j)) - \\ & \epsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* + \alpha_i) + \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i^*, \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (17)$$

解此二次规划问题式 (17), 得到拉格朗日乘子 α_i 、 α_i^* , 则式 (14) 中参数 w 为:

$$w = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i) \Phi(x_i) \quad (18)$$

将式 (18) 代入式 (14) 得:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi^T(x_i) \Phi(x) + b \quad (19)$$

由 Karush-Kuhn-Tucker 条件^[38] 计算得到偏置量 b , $\alpha_i^* - \alpha_i$ 只有小部分不为 0, 此时它们对应的输入样本即为支持向量。当满足 Mercer 条件时, 核函数 $K(x_i, x) \equiv \Phi^T(x_i) \Phi(x)$ 。本文采用的径向基核函数 (radius basis function, RBF) 为:

$$K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2) \quad (20)$$

式中, γ 为宽度参数, $\gamma > 0$ 。

最终得到基于 SVM 的系统作战效能评估模型为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2) + b \quad (21)$$

式中, x_i 为训练时的样本输入评估指标向量; x 为预测时的输入评估指标向量; $f(x)$ 为 SVM 模型的输出, 即系统作战效能评估值。

3.2 应用难点与改进

应用支持向量机的评估方法进行效能评估, 首先需要得到一定量的训练数据, 但是对于一些系统结构复杂、信息化程度高的非线性系统而言是比较困难的。此外该方法要求输入的评估指标只能是数字型数据, 但是对于一些不易量化的评估指标采用模糊函数或通过专家根据一些先验信息进行相应的赋值, 这就需要使用此方法的研究人员对各种类型的数据进行合理的编码。这样无形之中增加了计算量。

在信息化战争中, 由于系统结构、作战环境、参战力量等因素非常复杂, 面对复杂的非线性系统, 传统的效能评估方法已经不能满足要求, 因此开始将一些智能化的算法引入到系统效能的评估中, 如人工神经网络 (ANN)、证据理论等。运用这些智能化的方法进行效能评估, 通过对评估指标的学习, 再现专家的评估经验, 评估结果具有一定的客观真实性。

4 结束语

本文首先阐述了效能的概念和几种不同的定

义描述, 其次对系统效能和评估方法进行了详细的分类和归纳, 主要阐述了 4 种经典的系统效能评估方法, 分别是系统效能分析法 SEA、ADC 分析法、层次分析法 AHP、模糊综合评判法, 对最近新兴的系统效能评估方法, 如支持向量机评估法也进行了简要阐述。主要从方法的基本思想、主要步骤、应用难点、应用与改进等方面进行详细的阐述, 分析了各种方法的适用场景以及各自的优缺点。

在系统效能评估中, 很难存在一种完美的效能评估方法, 不同的效能评估方法具有不同的适用场景, 只能根据实际系统的复杂程度以及评估者所掌握的一些先验信息, 再结合评估方法选取适中的参考原则, 才能对系统效能进行合理有效的评估。本文对后期如何进行效能评估以及采用何种效能评估方法具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 罗兴柏. 陆军武器系统作战效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 18-25.
- [2] 程恺, 张宏军, 柳亚婷, 等. 作战效能及其评估方法研究综述 [J]. 系统科学学报, 2014, 22 (1): 88-92.
- [3] 尤扬. 系统效能评估及经典方法研究 [J]. 科技信息, 2008 (29): 217-219.
- [4] 谭乐祖, 杨明军, 向迎春, 等. 武器系统效能评估方法研究 [J]. 兵工自动化, 2010, 29 (8): 13-15.
- [5] Bednar E M. Feasibility study of variance reduction in the thunder campaign-level model [D]. Alabama: Air University, 2005.
- [6] Stone G F, McIntyre G A. The Joint Warfare System (JWARS): a modeling and analysis tool for the defense department [C]. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001.
- [7] 郭齐胜, 袁益民, 郅志刚. 军事装备效能及其评估方法研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2004, 18 (1): 1-5.
- [8] Bohner C M. Computer graphics for system effectiveness-analysis [R]. Massachusetts INST of Tech Cambridge Lab for Information and Decision Systems, 1986.
- [9] 曹星平. 支持向量机在武器系统效能评估中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (24): 6599-6602.
- [10] 程凯, 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.
- [11] 许桂明, 赵树林, 武攀. SEA 方法对指挥信息系统的效能分析 [J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2 (4): 31-35.

- [12] 何幼林, 程志高, 黄德所, 等. 基于 SEA 方法的炮兵雷达侦察能力评估模型 [J]. 兵工自动化, 2008, 27 (11): 6-9.
- [13] 李宗吉, 王树宗. 武器装备系统效能评估的几种方法 [J]. 海军工程大学学报, 2000 (1): 97-101.
- [14] 吴晓锋, 周智超. 系统效能分析的 SEA 方法 [J]. 舰船电子工程, 1998 (3): 31-35.
- [15] 邵正途, 朱和平. 基于 SEA 的弹道导弹预警系统作战效能分析 [J]. 战术导弹技术, 2011 (3): 6-10.
- [16] 宋朝河. 基于 SEA 的炮兵雷达侦察系统效能分析 [J]. 兵工自动化, 2008, 27 (11): 48-50.
- [17] 李志猛, 徐培德. 基于 SEA 的效能评价系统设计 [J]. 计算机仿真, 2004, 21 (2): 138-140.
- [18] 程梦梦, 项清, 胡煦莞. 基于 ADC 模型的防空反导作战效能评估 [J]. 通信电源技术, 2014, 31 (2): 19-21.
- [19] 孙杨超, 乐荣剑, 申赟. 基于 ADC 模型的侦察雷达效能评估研究 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (10): 62-64.
- [20] 孔勇, 孟祥忠, 王智, 等. 基于 ADC 模型的天波超视距雷达作战效能评估 [J]. 火控雷达技术, 2005, 34 (3): 77-79.
- [21] 王莲芬. 网络分析法 (ANP) 的理论与算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 21 (3): 44-50.
- [22] 张继春, 杨军. 基于 ADC 模型的炮兵指挥信息系统效能评估 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (7): 52-54.
- [23] 郑玉军, 张金林, 李跃华. 基于改进 ADC 方法的某型特种装备作战效能评估 [J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26 (3): 202-204.
- [24] 郭齐胜. 装备效能评估概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [25] Satty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 29-68.
- [26] 李莎澜, 刘清国, 魏文斌, 等. 应用模糊层次分析法评估雷达组网作战效能 [J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22 (1): 91-93.
- [27] 王旭赢, 王春艳, 周江. 基于灰色层次分析的雷达组网效能评估 [J]. 雷达与对抗, 2008 (1): 13-16.
- [28] 郑孝勇, 姚景顺. 基于模糊层次分析法的雷达效能评估方法 [J]. 现代雷达, 2012, 24 (2): 7-9.
- [29] 杨智, 董长清, 王黎. 改进层次分析法在雷达网探测效能评估的应用 [J]. 空军雷达学院学报, 2007, 21 (1): 14-17.
- [30] 郑玉军, 田康生, 陈果, 等. 基于灰色 AHP 的反导预警雷达作战效能评估 [J]. 装备学院学报, 2016, 27 (1): 111-115.
- [31] 王帅杰, 何俊, 王斌, 等. 基于改进模糊层次分析法的相控阵雷达效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40 (2): 90-93.
- [32] 华中生, 吴云燕, 徐晓燕. 一种 AHP 判断矩阵一致性调整的新方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25 (1): 38-40.
- [33] 姜艳萍, 樊治平, 王欣荣. AHP 中判断矩阵一致性改进方法的研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2001, 22 (4): 468-470.
- [34] 李梅霞. AHP 中判断矩阵一致性改进的一种新方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20 (2): 122-124.
- [35] 高鲁, 宋辉, 刘明. 信息化军事装备作战效能模糊综合评判及仿真分析 [J]. 四川兵工学报, 2006, 27 (2): 17-19.
- [36] Vapnik V N. An overview of statistical learning theory [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10 (5): 988-999.
- [37] Yuan S F, Chu F L. Support vector machines-based fault diagnosis for turbo-pump rotor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20 (4): 939-952.
- [38] Flake G W, Lawrence S. Efficient SVM regression training with SMO [J]. Machine Learning, 2002, 46 (1): 271-290.