

自动测试系统效能评估体系

王磊¹, 方洋旺¹, 徐鑫², 肖冰松¹

(1. 空军工程大学工程学院二系, 陕西 西安 710038;

2. 空军工程大学电讯工程学院四系, 陕西 西安 710077)

摘要: 为消除缺乏有效验证带来的自动测试系统(automatic test system, ATS)开发过程中可能存在的巨大风险,缩短研制周期,提出了 ATS 的效能评估体系(effectiveness evaluation system, EES)。根据军用 ATS 更注重于时间与测试能力的提升的特点,在 ADC 评估框架的基础上,结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)建立了基于作用域的 EES,有效地解决了 ATS 能力权值配置问题,并提出了 ATS 能力及其次级指标的数学评估模型,为 ATS 进行成本控制、可行性分析和风险论证提供了有效手段。

关键词: 作用域; 自动测试系统; 效能评估; 层次分析法

中图分类号: TP 301

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.12.24

Effectiveness evaluation system of ATS

WANG Lei¹, FANG Yang-wang¹, XU Xin², XIAO Bing-song¹

(1. Engineering Coll., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China;

2. Telecommunication Engineering Coll., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to eliminate the possible risk existing in the development of automatic test systems (ATS) due to the lack of effective verification, an effectiveness evaluation system (EES) of ATS is proposed. According to the characteristics that the military ATS puts more stress on promotion of test time and ability, the ADC evaluation architecture is set up, and integrating the analytic hierarchy process, the EES based on operation domain is built, which solves the problem of distributing weight of system ability. A math evaluation model of ATS ability and its sub target are put forward. The proposed system provides an effective way to control cost, analyze feasibility and demonstrate risk for ATS.

Keywords: operation domain; automatic test system; effectiveness evaluation; analytic hierarchy process

0 引言

传统上,自动测试系统(automatic test system, ATS)的开发首先进行需求分析,然后进行系统软硬件的设计,最后再进行集成。直接从需求分析阶段进入到设计阶段,缺少对测试需求、过程、算法和结果的评估和验证,系统设计阶段没有可用于验证的效能评估体系(effectiveness evaluation system, EES)。虽然国内外对多种武器装备的作战效能进行了一系列的研究^[1-3],但由于测试设备发展的历史原因导致现役测试设备种类繁多,实现技术不统一、性能良莠不齐,要建立通用的效能评估指标体系难度较大,因此到目前为止还没有对测试系统效能评估的研究。

ATS 作为战斗保障的重要组成部分,伴随现代科技的发展,战场环境进一步恶化,对其机动性、可靠性、生存能力和研制周期提出了更高的要求,突显了对 ATS 进行全面系统性评估的重要性和紧迫性。为消除在 ATS 开发过程中可

能产生巨大的风险,同时也为了缩短研制周期,本文采用美国工业界武器系统效能咨询委员会的 ADC 模型^[4]建立 ATS 效能评估顶层框架,结合基于作用域的分解方法对系统能力指标进行解算建立了 ATS 效能评估指标体系,为系统进入设计阶段前得到充分的验证提供了有效手段。

1 EES 需求分析

为有效分析 ATS 的效能指标体系,结合武器效能的定义^[5]将 ATS 效能定义如下:测试系统单位时间内能够完成给定测试任务的量度。任何系统的效能只能针对一组特定的任务而言,因此对于不同的作战平台 ATS 作战效能可能会有较大差异,因为其更多的是以一种软件形式存在,但随着测试网格理论的提出^[6]和系统框架的建立^[7],仅仅对 ATS 进行局部或针对单一武器系统的效能分析,显然不能全面有效的反映网络化 ATS 即测试网格的效能评估需求,评估结果将过于片面化。

收稿日期:2009-10-04; 修回日期:2010-04-15。

基金项目:国家自然科学基金(60874074);航空科学基金(20080196005)资助课题

作者简介:王磊(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为系统总体、仿真与控制。E-mail:wangbest.wl@163.com

ATS对被测单元(unit under test, UUT)的检测效能会因环境、技术人员和 UUT 的不同而有所差异。目前对武器装备进行效能评估,主要针对特定武器系统在一定环境下进行评估,这种评估方法会使评价结果不具有通用意义^[8],从而导致决策产生较大的局限性和风险性。因此,要完成对 ATS 效能评估,评估模型必须满足以下需求:

- (1) 通用性,能够实现对所有 ATS 进行评估,而不仅仅是针对测试网格。
- (2) 全面性,可以从系统设计阶段开始到系统定型进行全面的评估。
- (3) 稳定性,要求性能相对稳定,指标相对独立,受设备和环境因素影响较小。
- (4) 扩展性,要求能够方便地扩展新的评估指标,对 ATS 做出新的评估。
- (5) 可靠性,要求评估体系科学、完整,有较高的可信性。

2 ATS 通用效能评估方法

2.1 数学量与符号使用规范

在军事应用领域,ATS 并不直接构成战斗力,而是通

过对信息域 Z_{In} 、时间域 Z_{Ti} 、认知域 Z_{Co} 、物理域 Z_{Ph} 和支付域 Z_{Sp} 的影响从而减少测试时间和机动时间,增加装备出动率,从而最终提升武器系统的作战效能。目前常用的 ADC 效能评估结构,将系统开始执行时的状态由“可用性 A”描述,执行任务过程中的状态由“可信性 D”描述,完成给定任务的程度由系统的“能力 C”描述,这三大要素构成了系统的效能。指标 A、D 作为作战装备的共性指标,评估模型具有通用性,本文不作论述。

作为战斗保障的重要装备,影响 ATS 能力的次级指标分布于广泛的作用域,而军用 ATS 更关注于系统时间域和物理域的效能指标,如果直接比较次级指标,确定其权值,缺乏军事应用的合理性。

因此,本文首先采用 ADC 模型,对 EES 进行顶层设计;再对 ATS 的作用域进行划分,将基层指标归入不同的作用域,根据 AHP^[9] 的原则确定作用域和基层指标的权值;然后建立 ATS 能力及其构成指标的评估模型,并由基层指标的权值确定次级指标的权值,结合 ATS 的能力评估模型决定能力指标 C,最终得出系统效能 E,如图 1 所示。

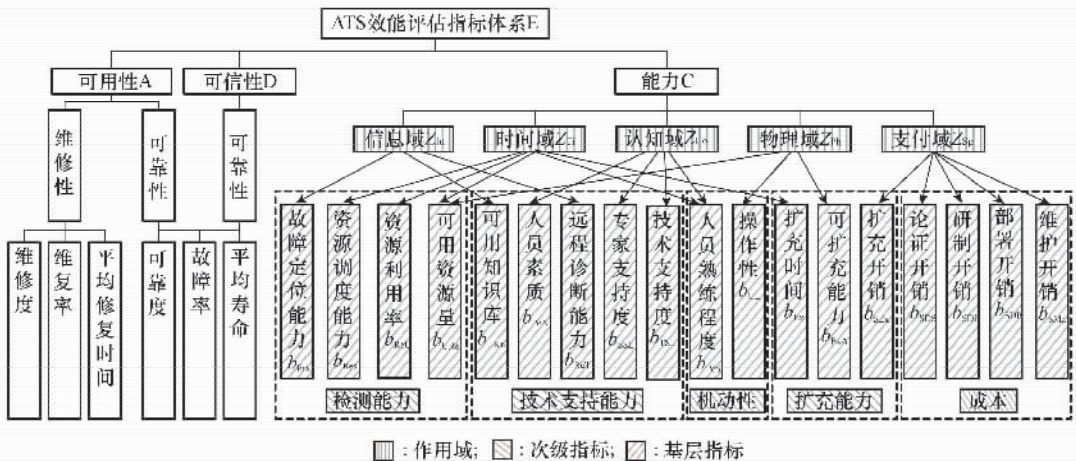


图 1 ATS 效能评估指标体系

2.2 基于 AHP 的能力指标权值计算

2.2.1 计算步骤和相关概念

AHP 通过因素之间比较来获取因素的重要性区别。结合作用域的原则,ATS 能力指标权值计算的基本过程可以分为五个方面的内容:构造判断矩阵、作用域层指标排序、基层指标排序、次级指标排序和一致性检验,定义如下。

构造判断矩阵 针对上一层级中的某元素而言,评定该层次中各有关元素相对重要性的状况。

作用域层指标排序 确定作用域元素间的权值。

基层指标排序 针对作用域层次中的某元素,确定基层指标层与之有联系的元素权值。

次级指标排序 利用基层指标层中所有层次单排序的结果,计算次级指标层元素的权值。

一致性检验 评价指标排序的一致性。

2.2.2 作用域指标排序

根据对 ATS 作用域的研究,建立如图 1 所示基于作用域的 ATS 能力评估层次结构,并根据作用域之间的重要关

系选择合适的标度^[10]构造判断矩阵,然后按如下步骤计算相对权值并进行一致性检验。

步骤 1 权值计算,计算判断矩阵中每行所有元素的几何平均值为

$$\bar{W} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)^T = \left(\left(\prod_{j=1}^n a_{1j} \right)^{\frac{1}{n}}, \left(\prod_{j=1}^n a_{2j} \right)^{\frac{1}{n}}, \dots, \left(\prod_{j=1}^n a_{nj} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^T \quad (1)$$

归一化,求得特征向量的近似值,即各元素的相对权值为

$$W = \left(\bar{w}_1 / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j, \bar{w}_2 / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j, \dots, \bar{w}_n / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j \right) \quad (2)$$

步骤 2 一致性检验,计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ,计算一致性指标(consistency index, CI), $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ 。由表 1 中查出相应的平均随机一致性指标(random index, RI),计算一致性比例(consistency ratio, CR), $CR = CI / RI$ 。若 $CR < 0.1$,认为判断矩阵的一致性是可以接受的;若 $CR \geq 0.1$,就需要对判断矩阵进行调整再重新计算。

表 1 平均随机一致性指标

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>RI</i>	0	0	0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4

2.2.3 基层和次级指标排序

根据各作用域相关指标构造基层指标关于各作用域的判断矩阵,计算相对权值并进行一致性检验。在得出基层指标关于各作用域的相对权值后,根据式(3)计算基层指标绝对权值为

$$W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] = \left[\sum_{i=1}^5 \omega_{1i}, \sum_{i=1}^5 \omega_{2i}, \dots, \sum_{i=1}^5 \omega_{ni} \right] \quad (3)$$

式中,*n*为基层指标的数量; ω_n 为第*n*个基层指标的权值,其值为指标*n*在各个作用域的相对权值之和。

排序完成后根据式(4)计算总排序一致性指标和随机一致性指标,分别为

$$CI = \sum_{i=1}^5 \omega_{zi} CI_i$$

$$RI = \sum_{i=1}^5 \omega_{zi} RI_i \quad (4)$$

同样以作用域一致性检验标准判断权值指标是否可以接受,然后根据基层指标的计算结果,计算次级指标权值为

$$W_C = [\omega_{c1}, \omega_{c2}, \dots, \omega_{cm}] \quad (5)$$

式中, ω_{ci} (*i*=1,2,⋯,*m*)为各次级指标权值,是其相关基层指标权值指和。

3 ATS 通用效能评估方法

3.1 基层指标含义

基层指标的可靠性、准确性和相互权值是影响 ATS 能力评估模型有效性和准确性的关键,因此在建立 ATS 能力评估模型前,应首先明确模型中基层指标的含义。ATS 指标可分为定量指标与定性指标,对于定量指标,由于指标内部结构、参数、特性信息确知,可以直接计算使用;而对于定性指标,其部分信息未知,需要对其进行定量和定性的分析,将其量化后才能使用。测试系统基层指标除人员素质是定性指标外,其余都为定量指标,可直接进行计算,其具体含义如表 2 所示。

表 2 基层指标含义

指标	含义
<i>b_{FaS}</i>	ATS 故障定位的平均时间
<i>b_{ReS}</i>	对给定测试任务的测试准备时间
<i>b_{ReU}</i>	ATS 忙碌状态占总测试时间比例
<i>b_{URe}</i>	可用于测试的资源数量和质量
<i>b_{UKn}</i>	可用于支持完成测试的知识量
<i>b_{PeA}</i>	操作人员素质,用灰色评估法得出 ^[11]
<i>b_{ReT}</i>	ATS 提供 UUT 检测状态的能力
<i>b_{SSL}</i>	可用于排查指导的专家量
<i>b_{TSL}</i>	可用于技术指导的技术员量
<i>b_{PeS}</i>	操作员对设备的熟悉程度和操作设备的时间
<i>b_{UL}</i>	测试设备的模块化程度和便携性
<i>b_{Ex}</i>	测试系统各接口的平均扩充时间
<i>b_{ExA}</i>	扩充其他测试功能预留的接口量
<i>b_{SEx}</i>	扩充新功能需要的研制、装备时间
<i>c_{Co}</i>	系统论证、研制、部署、维护开销

3.2 ATS 能力评估模型

ATS 的能力指标 *C* 由次级能力指标 [*c_{Test}*, *c_{Te}*, *c_{FI}*, *c_{Ex}*,

c_{Co}]构成,表现为能力在单位成本条件下的度量,结合次级指标比例权值 *W_C*,建立能力评估模型

$$C = \sqrt{\frac{\omega_{c1} c_T + \omega_{c2} c_{Te} + \omega_{c3} c_{FI} + \omega_{c4} \sqrt{c_{Ex}}}{\omega_{c5} c_{Co}}} \quad (6)$$

根据基层指标权值 *W* 和次级指标权值 *W_C* 计算各次级能力指标的基层指标值关于其归一化权值,以检测能力 *c_{Test}* 为例,其组成指标权值为: $W_{Test} = (\omega'_{FaS} = \omega_{FaS} / \omega_{c1}, \omega'_{ReS} = \omega_{ReS} / \omega_{c1}, \omega'_{ReU} = \omega_{ReU} / \omega_{c1}, \omega'_{URe} = \omega_{URe} / \omega_{c1})$ 。

在分析各次级指标和相关基层指标的基础上分别建立评估模型,其中 $b' = \omega' b$, 例如 $b'_{ReU} = \omega'_{ReU} \cdot b_{ReU}$ 。

检测能力 *c_{Test}* ATS 的完成额定工作量的能力,其评估模型为

$$c_{Test} = b'_{ReU} \cdot b'_{URe} / (b'_{FaS} + b'_{ReS}) \quad (7)$$

技术支持能力 *c_{Te}* 可对 ATS 实施技术支持的节点数量及能力,其评估模型为

$$c_{Te} = b'_{UKn} + b'_{PeA} + (b'_{SSL} + b'_{TSL}) / b'_{ReT} \quad (8)$$

机动性 *c_{FI}* ATS 的部署时间,其评估模型为

$$c_{FI} = 1 / b'_{PeS} + 1 / b'_{UL} \quad (9)$$

扩充能力 *c_{Ex}* ATS 可用于扩展的接口量及扩展开销,其评估模型可表示为

$$c_{Ex} = b'_{ExA} / b'_{Ex} + b'_{ExA} / b'_{SEx} \quad (10)$$

成本 *c_{Co}* ATS 从论证到使用维护的所有成本,其评估模型为

$$c_{Co} = (b'_{SDS} + b'_{SDL}) / n_d + b'_{SDP} + b'_{SMA} \cdot n_u \quad (11)$$

式中,*n_d*、*n_u*各代表设备的部署数量和使用年限。

4 算例分析

对于给定系统值如表 3 所示,且 *n_d* = 10, *n_u* = 20, 根据式(1)~式(5)计算次级指标关于作用域的权值并进行一致性指标判断,再根据 ATS 能力评估模型计算能力指标。

表 3 某 ATS 基层指标值

<i>b_{FaS}</i>	<i>b_{ReS}</i>	<i>b_{ReU} / %</i>	<i>b_{URe}</i>	<i>b_{UKn}</i>	<i>b_{PeA}</i>
10, 3	8, 25	32, 36	71, 8	2, 16	7, 254 1
<i>b_{ReT}</i>	<i>b_{SSL}</i>	<i>b_{TSL}</i>	<i>b_{PeS}</i>	<i>b_{UL}</i>	<i>b_{Ex}</i>
20, 3	2	2, 65	13, 5	304	1
<i>b_{ExA}</i>	<i>b_{SEx}</i>	<i>b_{SDS}</i>	<i>b_{SDL}</i>	<i>b_{SDP}</i>	<i>b_{SMA}</i>
5	1, 25	1, 45	6, 15	2, 35	0, 29

层次分析的关键在于以一定的标度把人的主观感觉数量化,出现最早而且使用最广泛的是 1-9 标度。1-9 标度简便易用,应用较为广泛,但其在定量人们的判断时不够准确,合理性较差,因此本文选择 10/10-18/2 标度^[8]。构造作用域层排序判断矩阵如表 4 所示,计算作用域权值 *W_Z* 并进行一致性检验。

表 4 目标层 C 与作用域层之间的判断矩阵

C	<i>Z_{In}</i>	<i>Z_{Ti}</i>	<i>Z_{Co}</i>	<i>Z_{Ph}</i>	<i>Z_{Sp}</i>	<i>W_Z</i>
<i>Z_{In}</i>	10/10	4/16	8/12	6/14	12/8	0.102 5
<i>Z_{Ti}</i>	16/4	10/10	14/6	12/8	18/2	0.425 2
<i>Z_{Co}</i>	12/8	6/14	10/10	8/12	14/6	0.160 5
<i>Z_{Ph}</i>	14/6	8/12	12/8	10/10	16/4	0.250 5
<i>Z_{Sp}</i>	8/12	2/18	6/14	4/16	10/10	0.061 3

$CI=0.006\ 6, CR=0.005\ 9, CR<0.1$,符合一致性检验标准,判断矩阵可以接受。

用同样方法计算基层指标关于各作用域的相对权值,并计算绝对权值如表 5 所示。

表 5 基层指标权值

Z	Z _{In}	Z _{Ti}	Z _{Co}	Z _{Ph}	Z _{Sp}	W
W_Z	0.102 5	0.425 2	0.160 5	0.250 5	0.061 3	
<i>b_{FaS}</i>	0.477 9					0.049 0
<i>b_{UKn}</i>	0.314 8					0.032 3
<i>b_{ReT}</i>	0.207 3					0.021 2
<i>b_{ReS}</i>		0.194 3				0.082 6
<i>b_{ReU}</i>		0.319 1				0.135 7
<i>b_{URe}</i>		0.319 1		0.477 9		0.255 4
<i>b_{PeS}</i>		0.124 7	0.259 8			0.094 7
<i>b_{Ex}</i>		0.042 9				0.018 2
<i>b_{PeA}</i>			0.396 9			0.063 7
<i>b_{SSL}</i>			0.171 6			0.027 5
<i>b_{TSL}</i>			0.171 6			0.027 5
<i>b_{UL}</i>				0.314 8		0.077 9
<i>b_{ExA}</i>				0.207 3		0.051 9
<i>b_{SEx}</i>					0.079 3	0.004 9
<i>b_{SDS}</i>					0.300 4	0.018 4
<i>b_{SDL}</i>					0.300 4	0.018 4
<i>b_{SDP}</i>					0.193 6	0.011 9
<i>b_{SMA}</i>					0.126 3	0.007 7

计算总排序一致性指标和随机一致性指标分别为

$$CI = \sum_{i=1}^5 \omega_{Zi} CI_i = 0.003\ 7$$

$$RI = \sum_{i=1}^5 \omega_{Zi} RI_i = 0.871\ 3$$

层次总排序随机一致性比率为

$$CR = CI/RI = 0.004\ 2 < 0.10$$

因此,基层指标排序的计算结果具有满意的一致性。

结合图 1 与表 5 基层指标权值,计算次级指标权值 W_C ,再根据 W_C 计算基层指标关于各次级指标的权值为

$$W_C = [0.522\ 7, 0.172\ 2, 0.172\ 6, 0.075\ 0, 0.056\ 4]$$

$$W_{Test} = [0.093\ 7, 0.158\ 0, 0.259\ 6, 0.488\ 6]$$

$$W_{Te} = [0.187\ 6, 0.369\ 9, 0.123\ 1, 0.159\ 7, 0.159\ 7]$$

$$W_{Fl} = [0.548\ 7, 0.4513]$$

$$W_{Ex} = [0.242\ 7, 0.692\ 0, 0.065\ 3]$$

$$W_{Co} = [0.326\ 2, 0.326\ 2, 0.211\ 0, 0.136\ 5]$$

$$W' = [W_T, W_{Te}, W_{Fl}, W_{Ex}, W_{Co}]$$

根据表 3 中基层指标值计算关于次级指标的归一化指标向量 B' ,然后计算出次级能力指标值 S 。

$$B' = W'B = [0.965\ 1, 1.303\ 7, 0.084\ 0, 35.081\ 5,$$

$$0.405\ 2, 2.683\ 3, 2.498\ 9, 0.319\ 4, 0.423\ 2,$$

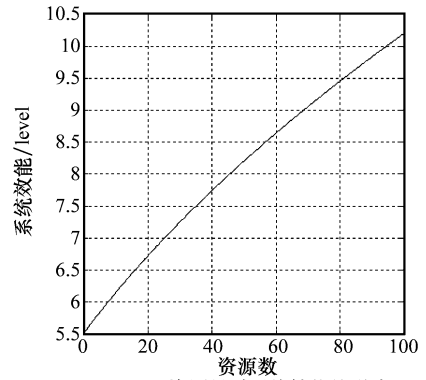
$$7.407\ 0, 137.205\ 1, 0.058\ 9, 3.460\ 0, 0.081\ 7,$$

$$0.473\ 0, 2.006\ 1, 0.495\ 9, 0.039\ 6]$$

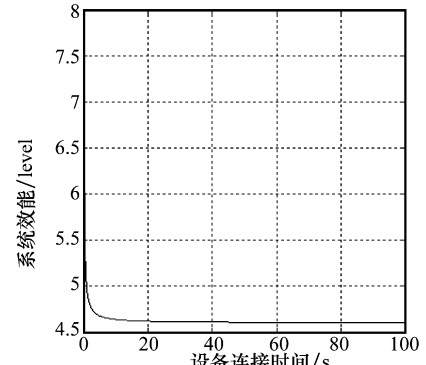
$$S = [1.288\ 2, 3.385\ 7, 0.142\ 3, 7.525\ 0, 1.535\ 6]$$

最后,根据次级指标评估模型式(6)~式(11)计算得出能力指标 C 。经过对 ATS 故障定位能力、人员熟练度、可用资源量和研制开销指标的分析,可以得出其对 ATS 效能

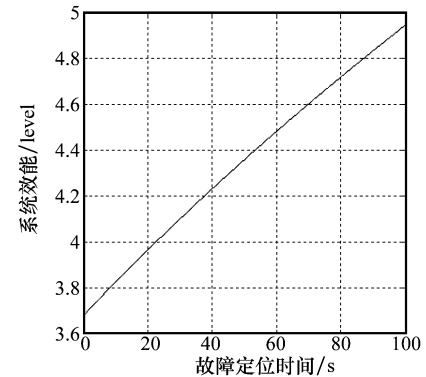
的影响,如图 2 所示。



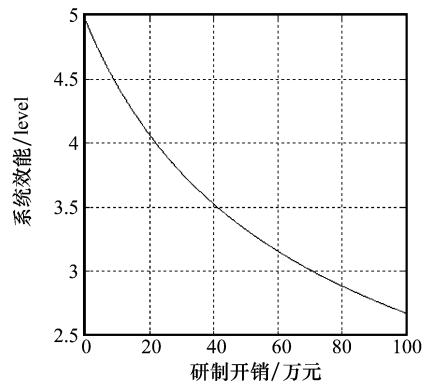
(a) 可用资源量对系统效能的影响



(b) 人员熟练程度对系统效能的影响



(c) 故障定位能力对系统效能的影响



(d) 研制开销对系统效能的影响

图 2 能力指标对 ATS 效能的影响