

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.012

基于 AHP 和灰色局势决策模型的装备 测试资源选择和优化配置

赵力, 史贤俊, 张志龙

(海军航空大学岸防兵学院, 山东烟台 264000)

摘要: 装备系统测试资源选择与配置是系统测试性设计方案的重要组成部分, 目前关于这方面的理论及相关技术文献十分有限, 且基本不涉及具体的评估与决策方法。首先考虑了影响装备系统测试资源选择和配置的主要因素, 确立优化目标的因素集; 然后借助层次分析法(AHP)获得各相关因素的重要程度权重; 接着利用灰色局势决策模型综合求解选择问题, 形成决策结论。最后结合案例验证, 表明该方法可以对测试资源选择和配置问题进行综合有效的权衡分析, 为测试资源的选择提供一条思路。

关键词: 测试资源选择与配置; 层次分析法; 灰色局势决策模型

中图分类号: TP206; V37 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0092-08

Method of Test Resource Selection and Optimal Allocation Based on AHP and Grey Situation Decision Model

ZHAO Li, SHI Xian-jun, ZHANG Zhi-long

(Coast Guard Academy, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: The selection and allocation of test resources for equipment system is an important part of the system testability scheme. At present, the technical literature on theory and related technologies of test resources selection is very limited, and there is no specific evaluation and decision method involved. This paper firstly analyzes the main factors that affect the selection and allocation of equipment system test resources and establishes the factor set of optimization object. Then the weight of importance of each related factor is obtained by analytic hierarchy process (AHP). Next the grey situation decision model is used to solve the selection problem comprehensively and the decision conclusion is formed. Finally, a case study shows that this method can make a comprehensive and effective trade-off analysis on the selection and configuration of test resources, and provides a way for the selection of test resources.

Key words: Test resource selection and configuration; Analytic hierarchy process; Grey situation decision model

收稿日期: 2021-11-30; **修订日期:** 2022-01-13

作者简介: 赵力(1998-), 男, 在读硕士, 主要从事测试性设计、故障诊断预测方面的研究。

通信作者: 史贤俊(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事自动控制、测试性和故障诊断方面的研究。

0 引言

现代武器装备越来越先进,功能的大幅提升带来的一定是越来越强的工艺和结构复杂性,因此对装备测试和诊断提出了更高的标准、更新的技术和更严格的要求,也带来了许多测试、诊断和维修保障问题^[1]。而测试性设计工作就是要在装备设计阶段并行考虑测试问题,综合应用机内测试(Built in Test, BIT)、自动测试设备(Automatic Test Equipment, ATE)、人工测试设备(Manual Test Equipment, MTE)等测试资源,通过优化设计^[2]用最小的测试代价得到最高效率的测试结果。在明确了装备可完成完全诊断能力的测试集后,需要通过测试资源选择与优化配置,执行该测试集所需要的测试资源,以获得最佳测试效率^[3]。然而,在实际应用中,测试资源类型多而复杂,选择与优化配置影响因素众多,是测试性分析中的一项复杂工作,仅从费用目标考虑约束有失偏颇。因此,在对测试资源进行选择和优化配置时,需要综合考虑其在测试过程中所能达到的各项目标,在各目标因素之间进行协调权衡与折中处理,进行效能和费用的综合评估,做出合理的决策,使得测试资源得到合理配置。从系统工程的角度看,可以通过多目标决策的方法使测试资源选择与优化配置问题得以解决。

文献[7]利用模糊综合评判的方法评价综合指标并做出决策,定量地描述了影响选择的评价指标,并提供了一个较为客观合理的方法。文献[8]利用灰色局势决策模型对万用表的选择进行分析,但分析过程中首次决策的权重通过比较法获得,不能客观定量地将指标因素刻画出来。文献[9]建立了基于测试任务的时间 Petri 网模型,并提出了最短测试时间和测试路径的定义,利用 Petri 网可达标识图分析方法,在综合航电系统并行测试资源优化配置中得出了最短测试时间,大幅提高了测试效率。文献[10]针对装甲装备保障测试设备的优化配置问题,结合基层级、中继级两级维修保障任务的特点,以装备平均维修时间最短为目标,建立了区域性设备能力最大覆盖模型和区域性设备建设时序规划模型,给出了模型求解方法,并通过仿真验证了模型的可行性。

本文提出了利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和灰色局势决策模型相结合的方法对测试资源选择与配置开展综合评判和决策。首先,对影响测试资源选择的主要因素进行了分

析,得到了优化问题因素集,为后续采用层次分析法获取各相关因素的重要程度权重提供支撑,然后利用灰色局势决策模型进行问题求解,最后进行了实例验证。

1 测试资源选择与优化配置影响因素分析

测试资源的选择和配置方案是权衡诸多因素影响的结果,收集与这些因素相关的资料信息,进行充分的分析、整理归纳,综合考虑影响效能及费用的各项要素,进一步确定影响测试资源选择的因素集。

1.1 系统自身物理特性因素 f_1

测试资源的选择是针对特定系统提出的,选择什么类型的测试设备主要受到该系统自身物理特性的限制^[3]。主要约束条件包括测试设备的体积、质量因素、结构复杂性和功耗等。例如,BIT 在主系统中运行,能快速检测和隔离故障,并实时监控装备系统的健康状况,这是传统测试设备所不具备的能力;但 BIT 内嵌入主系统将会增加质量、体积、功耗和结构复杂性等负担。而 ATE 虽然不影响主系统本身,但是无法满足实时监控装备的要求。

1.2 系统可靠性、维修性因素 f_2

在测试设备权衡选择的过程中,必须根据故障严酷度对系统危害程度的影响,优先检测那些故障率高、危害性大的部件或故障模式,即根据系统可靠性要求确定检测的重点以及需要使用的测试手段^[2]。例如,BIT 本身结构较为复杂,若使本来已经很复杂的系统再增加零部件,就会降低系统的可靠性,并且 BIT 还存在虚警和自身故障的问题,这也会对系统的可靠性造成不利影响。ATE 对系统的主要影响是在维修方面,将会增加大量的维修保障设备和 ATE 本身的维修活动。因此,从可靠性、维修性因素考虑,主要包括测试设备自身损坏的可能性、测试设备运行时损坏主系统的可能性、测试设备维修性影响以及对主系统的影响。

1.3 系统后勤保障因素 f_3

在进行测试资源选择与配置时,应该考虑装备系统所规定的后勤保障要求,不同的任务保障对测试资源的需求也不同。特别是那些需要长期一直保持良好战备完好率和状态的装备系统,实时监控和联机测试是必不可少的,BIT 是最佳选择。但如果系统中存在大量的 BIT 也将增加维修部件的数量,对维修保障提出更高要求。而把拥有许多功能

的集中式 ATE 综合起来会减少后勤负担,但 ATE 存在不能立即使用、需要搬运和连接电缆等缺陷。因此,需要分析权衡 BIT 和 ATE 的使用时机。所以在后勤保障方面,需要格外考虑测试设备设计工作量、运输因素和备件因素等。

1.4 操作人员水平因素 f_4

一般来说,使用 ATE 进行测试和诊断对于操作人员的技能水平要求较高,尤其是对于较为复杂系统的检测,就不是简单的“过”与“不过”,而是必须要求操作人员会选择使用相关的激励、对检测结果能够理解和判断、并在操作过程中能做出必要调整。而 BIT 由于集成化程度高、能提供较好的显示和处理,所以使用要求相对较少。基于此,需要更多地考虑对测试设备的认可程度、依赖性、操作复杂性和人员人身安全等。

1.5 测试设备应用性因素 f_5

这方面主要考虑测试设备的多功能性、长期和高频使用效益、使用不当的时机和装备系统对测试设备的适应性等^[3]。

1.6 测试费用因素 f_6

降低装备全寿命周期费用是在整个测试性方

案的设计权衡过程中必不可少的环节,也是进行测试性设计的重要目的^[3]。主要考虑测试设备的设计费用、安装费用、操作人员的培训费用、测试时的费用以及维修保障的费用等。

到现在,基本确立了优化问题的因素集 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$,下面就可以利用层次分析法获得各相关因素的重要程度权重 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$ 。

2 基于层次分析法的因素权重计算法

层次分析法由美国运筹学家匹兹堡大学教授萨蒂首先提出,利用标度的思想对人的主观因素进行了客观的量化,体现了定量与定性分析相结合的思想,适用于多种方案的比较选择,因此在日常生活中得到了广泛的应用。在利用层次分析法进行测试资源的选择决策时,可以根据以下四个步骤。

2.1 建立各影响因素的递阶层次结构

根据第 1 节分析的影响因素,明确了需要评价的目标、评价的准则和可选的方案,以此建立测试资源选择的层次结构图,如图 1 所示。

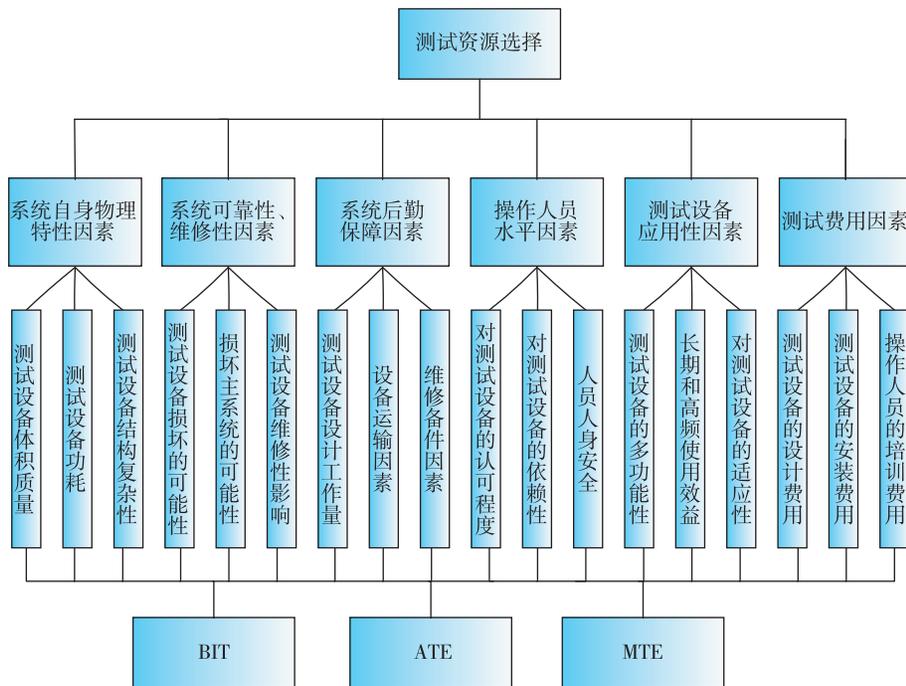


图 1 测试资源选择的层次分析结构

Fig. 1 The analytic hierarchy structure of test resource selection

由图 1 可知,第一层是需要评价的目标,即为目标层,对于采用什么样的测试资源,主要从众多可选测试设备中挑选最合适的设备完成测试任务;第二层是评价准则,需要根据这些准则来评价测试设备是否合适好用;第三层是基于准则层更加细化具体的指标层,由于影响选择的指标因素繁多复杂,本文旨在从系统级对装备的测试资源进行选择,因此指标层不做过多描述。

2.2 构造两两比较的判断矩阵

在构建完成各影响因素的递阶层次结构后,需要建立每个层次的影响因素相对于上一层的相对重要性的两两比较矩阵。由上文可知,需要分别得出准则层关于目标层的一组权重向量和方案层相对于准则层的五组权重向量,一共 6 个判断矩阵。下面根据萨蒂教授提出的标度因子来量化主观因素,从而将两两比较得出的重要性填充到矩阵中,如表 1 所示。

表 1 标度因子的含义
Tab. 1 Meaning of scale factor

标度	表示含义
1	表示两个因素相比较,具有相同的重要性
3	表示两个因素相比较,前一个因素比后一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比较,前一个因素比后一个因素明显重要
7	表示两个因素相比较,前一个因素比后一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比较,前一个因素比后一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	上述重要性判断反过来

以准则层关于目标层的判断矩阵为例进行阐述,结合专家经验给出评价决策,构造判断矩阵,如表 2 和式(1)所示。由此可以得到判断矩阵 A 的构建过程,并且观察到判断矩阵有如下特点:

- 1) a_{ij} 表示与指标 j 相比, i 的重要程度。
- 2) $a_{ij} > 0; a_{ji} = 1/a_{ij}; a_{ii} = 1$; 这样的矩阵被称为正互反矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 4 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 4 & 1/4 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/6 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 2 & 1 & 1/5 \\ 2 & 3 & 4 & 6 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 2 准则层关于目标层的判断矩阵

Tab. 2 Criterion layer judgment matrix about target layer

测试资源选择	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
f_1	1	2	3	5	4	1/2
f_2	1/2	1	2	4	3	1/3
f_3	1/3	1/2	1	3	2	1/4
f_4	1/5	1/4	1/3	1	1/2	1/6
f_5	1/4	1/3	1/2	2	1	1/5
f_6	2	3	4	6	5	1

2.3 检验判断矩阵是否具有 consistency

文献[4]提供了一种判断矩阵是否具有 consistency 的有效方式。由于测试设备的选取受影响因素的复杂性、人的主观意愿和偏好程度等影响,很难在相同准则下将各因素间的差别度量得很准确,并且构造的矩阵大都是正反矩阵,难免会出现矛盾,即不容易构造出 consistency 矩阵,但可以向 consistency 矩阵靠拢。通过构造一个度量标准,衡量 A 的不 consistency 程度,具体计算过程如下:

Step1: 计算 consistency 指标 CI , 如式(2)所示。

Step2: 在表 3 中寻找对应的平均随机 consistency 指标 RI 。

Step3: 计算 consistency 比例 CR , 如式(3)所示。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

其中: CI 表示 consistency 指标; CR 表示 consistency 比例; λ_{max} 表示判断矩阵 A 的最大特征值; n 表示矩阵 A 的维数。

表 3 一致性指标对照表

Tab. 3 Consistency indicator table

n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.5149	0.8931	1.1185
n	6	7	8	9	10
RI	1.2494	1.345	1.42	1.462	1.4874
n	11	12	13	14	15
RI	1.5156	1.5405	1.5583	1.5779	1.5894

在实际应用中, n 很少超越 10, 如果指标个数大于 10, 则可以构建二级指标。若 $CR \leq 0.1$ 时, 则认定判断矩阵的 consistency 在可接受范围内, 反之需要

对判断矩阵进行更正。本文提及的6个矩阵均已通过了一致性验证,接下来是计算权重。

2.4 计算指标权重,得到权重结果

常用的计算权重的方法有三种:算术平均法求权重、几何平均法求权重、特征值法求权重。首先根据判断矩阵A计算准则层相对于目标层的权重关系,然后同理可以通过判断矩阵B求得方案层C的权重指标。下面举例说明具体计算方法,如表4所示。

表4 以测试设备应用因素举例

Tab. 4 Example of test equipment application factors

测试设备应用因素	BIT	ATE	MTE
BIT	1	2	5
ATE	1/2	1	2
MTE	1/5	1/2	1

1)算术平均法求权重,如式(4)所示,先将矩阵的各元素按列进行归一化,再将归一化后的各列按行相加,最后得到的行向量每一个元素除以 n ,即可得到权重向量,如表5所示。

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, (i=1,2,3,\dots,n) \quad (4)$$

表5 算术平均法权重向量

Tab. 5 Weight vector of arithmetic mean method

测试设备应用因素	权重
BIT	1.7846/3=0.5949
ATE	0.8298/3=0.2766
MTE	0.3856/3=0.1285

2)几何平均法求权重,如式(5)所示,先将矩阵中的元素按行相乘获得一个新的列向量,然后将新的向量中的各元素开 n 次方,最后对该列向量进行归一化处理,便可获得权重向量,如表6所示。

$$\omega_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}}, (i=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

表6 几何平均法权重向量

Tab. 6 Weight vector of geometric average method

测试设备应用因素	权重
BIT	0.5954
ATE	0.2764
MTE	0.1283

3)特征值法求权重

引理:A为 n 阶方阵, $r(A)=1$,则A有一个特征值为 $\text{tr}(A)$,其余特征值均为0。

由引理可知:一致矩阵有一个特征值为 n ,其余特征值为0。另外,可以得到特征值为 n 时,对应的特征向量刚好如式(6)所示,所以可以直接将特征向量归一化,即可获得权重向量。求取结果为:最大特征值3.0055,一致性比例 $CR=0.0053$,对应的特征向量 $[-0.8902 \quad -0.4132 \quad -0.1918]$,归一化得到的权重向量 $[0.5954 \quad 0.2764 \quad 0.1283]$ 。

三种方法求得的权重向量如表7所示,同理可得其他判断矩阵的计算结果,最后将其填充至权重矩阵,如表8所示。

$$k \left[\frac{1}{a_{11}}, \frac{1}{a_{12}}, \frac{1}{a_{13}}, \dots, \frac{1}{a_{1n}} \right] (k \neq 0) \quad (6)$$

表7 三种方法求权重对比

Tab. 7 Comparison of three methods for weights

测试设备应用因素	算术平均法	几何平均法	特征值法
BIT	0.5949	0.5954	0.5954
ATE	0.2766	0.2764	0.2764
MTE	0.1285	0.1283	0.1283

表8 综合权重

Tab. 8 The comprehensive weights

	指标权重	BIT	ATE	MTE
系统物理特性因素	0.2690	0.1429	0.4286	0.4286
可靠性维修性因素	0.1444	0.0819	0.2363	0.6817
后勤保障因素	0.0881	0.6667	0.1667	0.1667
操作人员水平因素	0.0358	0.6337	0.1919	0.1774
应用性因素	0.0533	0.5954	0.2764	0.1283
测试费用因素	0.4095	0.4864	0.3586	0.1550

3 测试资源选择与优化配置灰色决策方法

3.1 引入基本概念,建立灰色决策模型

定义1:构成决策的4个要素是{事件,对策,目标,效果}。

定义2:对于完成装备系统的测试任务,需要一系列测试操作 $t_i (i=1,2,\dots,n)$,在决策过程中所有的测试就是事件,因此事件集记为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

定义3:测试 t_i 是事件集中的元素,对于每一个测试都需要给予相应的可选对策,因此将测试资源 $e_j (j=1,2,\dots,m)$ 作为相应的对策,则能够完成事件集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 的所有测试资源就记为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 。

定义 4:局势集 S 定义为事件集 T 与对策集 E 的笛卡尔乘积,即 $S = T \times E = \{(t_i, e_j) \mid t_i \in T, e_j \in E\}$ 。

由局势集的定义可知,对于任意 $t_i \in T, e_j \in E$,称 $s_{ij}^k = (t_i^k, e_j^k)$ 为第 k 个目标下的局势。那么,局势 $s_{ij}^k = (t_i^k, e_j^k)$ 在第 k 个目标下的样本值记为 $y_{ij}^k, \mathbf{Y}^k = (y_{ij}^k)$ 记为局势 $s_{ij}^k = (t_i^k, e_j^k)$ 在第 k ($k = 1, 2, \dots, l$) 个目标下的样本矩阵。

定义 5:记灰色局势决策系统的描述为 $G = ((F, T, Y), \mathbf{Y}^k)$,将决策的结论记为 V ,决策系统与决策目标的关系记为 $M: F \times T \times S \rightarrow V$,则测试资源的选择与优化配置问题的数学模型可以描述为

$$\begin{aligned} G &= ((F, T, Y), \mathbf{Y}^k) \\ M: F \times T \times S &\rightarrow V \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 测试资源选择与优化配置的具体步骤

Step1:对测试资源的选择问题进行数学抽象化描述,定义四元组集合 {测试集, 备选测试资源, 决策目标集, 决策结论}, 然后给出事件集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 和对策集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 构造出局势集 $S = T \times E = \{(t_i, e_j) \mid t_i \in T, e_j \in E\}$ 。

Step2:利用前文层次分析法得出关于决策目标集 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$ 中每个目标因素相应的重要度,即权重 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$ 。

Step3:在具体操作中,对于每一个目标因素 f_k , 每一个局势 s_{ij} 都有一个效果样本值 y_{ij}^k , 那么对于所有的局势就应该有一个效果样本矩阵,如式(8)所示。

$$\mathbf{Y}^k = \begin{bmatrix} y_{11}^k & y_{12}^k & \cdots & y_{1m}^k \\ y_{21}^k & y_{22}^k & \cdots & y_{2m}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1}^k & y_{n2}^k & \cdots & y_{nm}^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

Step4:考虑到每个目标因素对应的含义和要求不同,量纲也不同,因此采用灰色关联变换对效果样本矩阵 \mathbf{Y}^k 做统一量纲处理,操作如下:

对于正向指标(即越大越好),采用式(9)的上限效果测度对其统一量纲;对于负向指标(即越小越好),采用式(10)的下限效果测度对其统一量纲。由此便可获得目标因素 f_k 下的效果测度矩阵,如式(11)所示。

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{y_{ij}^{(k)}}{\max_i \max_j \{y_{ij}^{(k)}\}} \quad (9)$$

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{\min_i \min_j \{y_{ij}^{(k)}\}}{y_{ij}^{(k)}} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}^k = \begin{bmatrix} r_{11}^k & r_{12}^k & \cdots & r_{1m}^k \\ r_{21}^k & r_{22}^k & \cdots & r_{2m}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1}^k & r_{n2}^k & \cdots & r_{nm}^k \end{bmatrix} \quad (11)$$

Step5:将各目标因素对应的局势效果测度矩阵用层次分析法得到的权重进行加权合成,进一步得到综合测度矩阵,如式(12)所示。

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^6 \lambda_k \mathbf{R}^k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Step6:按照最佳效果 $r_{ij}^* = \max_{1 \leq j \leq m} r_{ij}$ 选择每个测试事件 t_i 的最优对策 e_j , 形成最终的决策结论 (t_i, e_j) , 这样就完成了测试资源的选择和优化配置。

3.3 案例验证

此仿真案例以某型装备的稳定跟踪平台为例,已经在前期完成了测试优化选择工作,获得了完成该稳定平台系统级测试任务的最佳完备测试集,共有 12 个测试任务构成,如表 9 所示,该测试事件集用 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{12}\}$ 表示。备选测试集包括 MTE、ATE、BIT, 分别用 $\{MTE, ATE, BIT\}$ 表示。

表 9 案例系统的测试集

Tab. 9 Test set for the case system

t_1	t_2	t_3	t_4
主控计算机测试	运动控制器测试	数据采集板测试	速率陀螺测试
t_5	t_6	t_7	t_8
电机驱动器测试	减速器测试	总线测试	光电编码器测试
t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
控制电路板测试	数字接收机测试	电源测试	电机测试

在系统测试资源的选择与配置时,决策目标集的定义和各目标因素的权重向量如下所示。

$$\mathbf{F} = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \text{系统物理特性约束最小,系统可靠性和} \\ \text{维修性最优,后勤保障性能最优,技术人员} \\ \text{水平要求最小,应用性能最优,测试费用最少} \end{array} \right\}$$

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$$

$$= \{0.2690, 0.1444, 0.0881, 0.0358, 0.0533, 0.4095\}$$

下面以测试费用目标为例,在费用约束条件下,对系统进行测试资源配置操作的效果样本矩阵如式(13)所示。不管采用哪种测试设备,总是希望

总体的测试费用越少越好,所以测试费用因素作为负向指标,应采用式(10)的下限效果测度来统一量纲,获得测试费用目标下的效果测度矩阵如式(14)所示。同理可以得到其他目标因素 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 对应的效果测度矩阵,分别是 R^1, R^2, R^3, R^4, R^5 。然后利用加权合成式 $R = \sum_{k=1}^6 \lambda_k R^k$ 求得综合效

果测度矩阵如式(15)所示。

$$Y^6 = \begin{bmatrix} 66 & 49 & 39 & 48 & 43 & 49 & 43 & 53 & 41 & 70 & 23 & 16 \\ 17 & 14 & 34 & 37 & 32 & 56 & 48 & 56 & 66 & 68 & 22 & 18 \\ 52 & 16 & 42 & 42 & 62 & 39 & 34 & 50 & 54 & 41 & 31 & 19 \end{bmatrix}^T \tag{13}$$

$$R^6 = \begin{bmatrix} 0.2121 & 0.2857 & 0.3590 & 0.2917 & 0.3256 & 0.2857 & 0.3256 & 0.2642 & 0.3415 & 0.2000 & 0.6087 & 0.8750 \\ 0.8235 & 1 & 0.4118 & 0.3784 & 0.4375 & 0.2500 & 0.2917 & 0.2500 & 0.2121 & 0.2059 & 0.6364 & 0.7778 \\ 0.2692 & 0.8750 & 0.3333 & 0.3333 & 0.2258 & 0.3590 & 0.4118 & 0.2800 & 0.2593 & 0.3415 & 0.4516 & 0.7368 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$R = \begin{matrix} MTE \\ ATE \\ BIT \end{matrix} \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} \\ 0.3276 & 0.2196 & 0.3248 & 0.4431 & 0.5183 & 0.3639 & 0.3617 & 0.3817 & 0.3221 & 0.2668 & 0.2759 & 0.6554 \\ 0.2993 & 0.3979 & 0.2701 & 0.4085 & 0.6158 & 0.4399 & 0.4808 & 0.4316 & 0.2795 & 0.2453 & 0.4121 & 0.5330 \\ 0.6203 & 0.7409 & 0.3552 & 0.4569 & 0.4000 & 0.3034 & 0.3446 & 0.4900 & 0.4541 & 0.5568 & 0.1983 & 0.3073 \end{bmatrix} \tag{15}$$

根据矩阵 R 中各列元素大小,进一步得到决策结论,为每一个测试都配置了对应的测试资源,如表 10 所示。至此,系统地完成了测试资源的选择与

优化配置,本文提出的基于层次分析法和灰色局势决策模型综合求解在实例验证中得到的结论与实际情况比较符合,验证了方法的可用性。

表 10 案例系统测试资源配置结论

Tab. 10 Test resource configuration conclusion of case system

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
MTE												✓
ATE					✓	✓	✓				✓	
BIT	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓		

4 结论

本文提出了采用层次分析法和灰色局势决策模型相结合的方法,应用于测试资源的选择和优化配置问题:1)既对人的主观判断进行了量化处理,也建立了定量指标的计算和定性指标的评估,克服了选择的随意性;2)同时在准确性、客观性和经济性方面有较好的分析处理,降低了各种不确定性因素对选择结果造成的不利影响;3)为从总体上进行测试资源的选择与配置,在装备测试与诊断过程中提供了符合实际的方法。

参考文献

[1] 田仲,石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
Tian Zhong, Shi Junyou. Testability design analysis and verification of system[M]. Beijing: Beihang University Press,2002(in Chinese).

[2] GJB 2547—95. 装备测试性大纲[S]. 北京:国防科工

委军标出版社,1995.
GJB 2547—95. Equipment testability outline[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defence,1995(in Chinese).

[3] 邱静,刘冠军,杨鹏,等. 装备测试性建模与设计技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
Qiu Jing, Liu Guanjun, Yang Peng, et al. Equipment testability modeling and design technology[M]. Beijing: Science Press,2012(in Chinese).

[4] 赵焕臣,许树柏,和金生. 层次分析法[M]. 北京:科学出版社,1986.
Zhao Huanchen, Xu Shubai, He Jinsheng. Analytic hierarchy process[M]. Beijing: Science Press,1986 (in Chinese).

[5] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1989.
Wang Lianfen, Xu Shubai. Introduction to analytic hierarchy process[M]. Beijing: China Renmin University Press,1989(in Chinese).

[6] 熊立,梁樑,王国华. 层次分析法中数字标度的选择

- 与评价方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(3):72-79.
- Xiong Li, Liang Liang, Wang Guohua. Research on the selection and evaluation method of digital scale in analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(3):72-79(in Chinese).
- [7] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(1):68-73.
- Chen Xixiang, Qiu Jing, Liu Guanjun. Research on test equipment selection method based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(1): 68-73(in Chinese).
- [8] 梁雅俊, 张智谦, 梁鹏, 等. ATS资源选择与配置的灰色局势决策模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(5):35-38.
- Liang Yajun, Zhang Zhiqian, Liang Peng, et al. Grey situation decision model for ATS resource selection and allocation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(5):35-38(in Chinese).
- [9] 张雷, 查晨东, 常天庆, 等. 装甲装备保障测试设备的优化配置模型[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(6):86-89.
- Zhang Lei, Zha Chendong, Chang Tianqing, et al. Optimization configuration model of test equipment for armored equipment support[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(6):86-89(in Chinese).
- [10] 周一鸣, 王茜, 荣鹏辉, 等. 基于灰色局势决策的航空弹药保障装备备件品种确定方法[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(5):56-59+101.
- Zhou Yiming, Wang Qian, Rong Penghui, et al. Determination method of spare part varieties for air ammunition support equipment based on grey situation decision-making[J]. Ship Electronic Countermeasures, 2017, 40(5):56-59+101(in Chinese).
- [11] 党耀国, 王正新, 刘丹华. 灰色局势决策目标权重的优化方法[C]//第16届全国灰色系统学术会议论文集. 中国高等科学技术中心, 2008:8.
- Dang Yaoguo, Wang Zhengxin, Liu Danhua. Optimization method of objective weight of grey situation decision making[C]// Proceedings of 16th National Conference on Grey Systems. China Advanced Science and Technology Center, 2008:8(in Chinese).
- [12] Chen Q, Yi M, Man X. Grey theory and AHP applied in performance evaluation of tactical communication network information system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1982(1):012147.
- [13] Hui P T, Ngo T L, Chen P C, et al. A grey system theory-based default prediction model for construction firms[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, 30(2):120-134.
- [14] Hwang S N, Lin C T, Chuang W C. Formulating a novel stock selection model using DEA and grey situation decision model[J]. Journal of Statistics and Management Systems, 2013, 10(1):103-127.
- [15] 郑玉航. 航天测控系统测试资源优化配置策略[J]. 中国设备工程, 2020(7):162-164.
- Zheng Yuhang. Optimal allocation strategy of space TT&C system test resources[J]. China Equipment Engineering, 2020(7):162-164(in Chinese).
- [16] Yao Z, Zhu L, Zhang T, et al. Optimal selection of tests for fault diagnosis in multi-path system with time-delay[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 2020, 36(6):75-86.
- [17] 张建东, 王硕, 史国庆, 等. 一种综合航电系统并行测试资源优化配置方法[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(6):1040-1046.
- Zhang Jiandong, Wang Shuo, Shi Guoqing, et al. An approach of test resource allocation optimization on integrated avionics system parallel testin[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(6):1040-1046(in Chinese).
- [18] Gokilavani N, Bharathi B. Multi-objective based test case selection and prioritization for distributed cloud environment[J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 82(8):103964.
- [19] 杜敏杰, 蔡金燕, 刘利民. 用 AHP 方法优化电子装备测试点的 BITE 与 ATE 分配[J]. 电光与控制, 2012, 19(6):84-87+91.
- Du Minjie, Cai Jinyan, Liu Limin. AHP method to optimize BITE and ATE allocation of electronic equipment test point[J]. Electro-Optics & Control, 2012, 19(6):84-87+91(in Chinese).
- [20] Gokilavani N, Bharathi B. Multi-objective based test case selection and prioritization for distributed cloud environment[J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 82(8):103964.

(编辑:李瑾)