

# 基于解释结构模型的装备测试性影响因素分析方法

张宇<sup>1,2</sup>, 程中华<sup>1</sup>, 连光耀<sup>2</sup>, 赵润泽<sup>1,3</sup>, 王金炯<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 32181 部队, 西安 710032;

3. 陆军装备部驻石家庄地区第三军事代表室, 石家庄 050003)

**摘要:** 测试性是装备的一种通用质量特性, 有着与可靠性、维修性、保障性一样重要的作用, 通过将装备测试性影响因素之间关系进行整理和剖析, 对提升武器装备的使用保障性能力、战备完整度以及减少全寿命系统损耗等都有着重要的意义; 采用了德尔菲方法得出 16 种影响装备测试性的相关影响因素, 并在此基础上引入解释结构模型 (ISM), 从而建立装备测试性相关影响因素的解释结构模型, 以探求装备测试性各影响因素间的层次性和关联性; 结果表明, 装备测试性影响因素的关系结构可划分为 6 个层级与 3 个层次, 运用“手段-目的分析”方法识别出影响装备测试性的 5 个最关键的影响因素, 并通过对装备系统复杂程度、研制方技术及管理水平、研制经费、测试分系统间接接口兼容性以及测试点选择合理性的分析, 为提高装备测试性水平提供对策建议。

**关键词:** 装备测试性; 解释结构模型; 影响因素分析

## Analysis Method of Influencing Factors of Equipment Testability Based on Interpretive Structure Model

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, CHENG Zhonghua<sup>1</sup>, LIAN Guangyao<sup>2</sup>, ZHAO Runze<sup>1,3</sup>, WANG Jinguo<sup>1</sup>

(1. Department of Equipment Command and Management, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA,

Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710032, China;

3. Third Military Representative Office of The Army Equipment Department in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** As a general quality characteristic of equipment, testability has the same important roles of reliability, maintainability and supportability. The hierarchical relationship of factors affecting the testability of equipment is clarified, which plays an important role in improving the maintenance supportability level and combat readiness of weapons and equipment and reducing the cost of whole life cycle. Delphi method is used to obtain sixteen influence factors of the equipment testability, and on this basis, an interpretive structure model (ISM) is used to build a relationship structure model of influence factor of equipment testability, so as to explore the correlation between various influencing factors of the equipment testability. The results show that the relationship structure of the factors affecting the testability of the equipment can be divided into six levels and three stages. The “means purpose analysis” method is used to identify five most critical factors affecting the testability of the equipment, which provides with the countermeasure and suggestion for improving the testability of the equipment.

**Keywords:** equipment testability; explain the structural model; analysis of influencing factors

## 0 引言

测试性属于装备通用质量特性, 是指装备能及时准确地确定其状态 (可工作、不可工作或性能下降), 并有效隔离其内部故障的一种设计特性, 已经成为影响装备保障效能发挥的重要因素<sup>[1-2]</sup>, 良好的测试性设计可以电子装备故障检测隔离效率, 显著降低装备维修保障难度和全寿命周期费用, 对保证装备战备完好性和任务成功性具有重要作用<sup>[3-4]</sup>。

测试性最早由 F. Liour 等人于 1975 年针对复杂电子及

机电设备的测试有效性问题在《设备自动测试性设计》中提出, 并相继应用于自动测试系统、诊断设计优化等领域<sup>[5]</sup>。20 世纪 70 年代开始, 国外开始广泛重视测试性研究, 尤其以美军为主, 其国防部于 1985 年颁布了测试性领域总结性的标准 MIL-STD-2165, 规定了测试性是装备设计中必须考虑的重要指标要求, 并明确了各阶段的工作要求<sup>[6]</sup>。

国内于 20 世纪 80 年代末开始引进测试性理论, 并逐渐形成了较为完整的标准规范, 典型的有 HB6437-90《电子

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金(71871219); 国防预研项目(50904020501)。

作者简介: 张宇(1994-), 男, 山东莱阳人, 大学本科, 助理工程师, 主要从事装备保障方向的研究。

通讯作者: 程中华(1972-), 男, 博士研究生, 教授, 主要从事装备保障方向的研究。

引用格式: 张宇, 程中华, 连光耀, 等. 基于解释结构模型的装备测试性影响因素分析方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 64-69, 77.

系统和设备的可测试性大纲》<sup>[7]</sup>、GJB3385-98《测试与诊断术语》<sup>[8]</sup>、GJB2547A《装备测试性工作通用要求》<sup>[3]</sup>等。此外,北京理工大学、西北工业大学、国防科技大学、军械工程研究所等单位学者也都开展了测试性研究,大大促进了测试性工作的快速发展<sup>[9-10]</sup>。

近年来,在武器装备研制过程中,研制单位已经越来越重视测试性设计工作,装备管理和设计理念也在不断变革,装备测试性研究已取得了较多学术成果<sup>[11]</sup>。不过,当前的研究主要是针对诸如 FMECA 方法、故障注入技术、测试性验证试验与评估等相对具体的技术和方法,而从宏观出发,研究整个装备测试性设计研制过程中,影响装备测试性水平因素的成果相对匮乏。

因此,有三个问题需要本文在研究中重点解决:一是装备测试性的影响因素有哪些?二是各影响因素之间具有怎样的结构关系?三是研制方如何针对关键性影响因素进行装备测试性提升?为回答上述研究问题,本文基于德尔菲法提炼出影响装备测试性的 16 个因素,并运用解释结构模型 (ISM, interpretive structure model) 方法,构建装备测试性影响因素的解释结构模型,可以清晰地厘清各影响因素之间的规律关联性和结构层次性,并找出关键因素,可为进一步提高装备测试性水平提供对策。

## 1 装备测试性影响因素分析

装备测试性设计研制是一项系统性工程,其影响因素复杂多样,从不同角度可提炼出不同的影响因素。本文基于装备测试性验证试验不同阶段的具体工作内容并结合相关文献,初步确定装备测试性的相关影响因素,之后通过德尔菲法,确定最终影响装备测试性的因素,主要从受试装备自身、研制外部条件、具体实施方法和测试系统自身四个方面进行分析。

### 1.1 受试装备自身

装备的测试性水平在很大程度上会受到自身先决条件的影响,装备的系统复杂程度以及装备的实时技术状态都是重要的影响因素<sup>[12]</sup>。

### 1.2 研制外部条件

研制外部条件包括研制经费、研制方技术水平、实验室设备及环境条件和操作人员专业程度等<sup>[4]</sup>,良好的外部研制条件也是提升装备测试性水平的重要因素。

### 1.3 具体实施方法

具体实施方法是指在装备测试性研制过程中所需要用的资料和方法,包括 FMECA 报告质量水平、故障模式筛选合理性、故障样本选取方法合理性、测试点选择合理性、故障注入方法合理性以及指标评估方法合理性等<sup>[13]</sup>。

### 1.4 测试系统自身

测试系统自身主要是指其监视和测试能力以及分系统间的兼容性,包括系统状态监视能力、人工检测能力、机内测试能力和测试分系统间接口兼容性<sup>[14]</sup>等。

考虑以上 4 个方面并参考近年的相关文献资料,筛选了装备测试性水平的 16 个相关影响因素(见表 1)。

表 1 装备测试性相关影响因素

序号	相关影响因素	符号表示
1	装备系统复杂程度	$E_1$
2	受试装备技术状态	$E_2$
3	研制经费	$E_3$
4	研制方技术及管理水平	$E_4$
5	实验室设备及环境条件	$E_5$
6	操作人员专业程度	$E_6$
7	FMECA 报告质量水平	$E_7$
8	故障模式筛选合理性	$E_8$
9	故障样本选取方法合理性	$E_9$
10	测试点选择合理性	$E_{10}$
11	故障注入方法合理性	$E_{11}$
12	指标评估方法合理性	$E_{12}$
13	系统状态监视能力	$E_{13}$
14	人工检测能力	$E_{14}$
15	机内测试能力	$E_{15}$
16	测试分系统间接口兼容性	$E_{16}$

## 2 装备测试性影响因素的 ISM 模型构建

解释结构模型 (ISM, interpretive structural model) 是美国 J. N. Warfield 教授在解析复杂技术系统层级构造问题时所提供的静态结构分析方法。该模式主要是指学者通过运用在该学科领域长期工作的经验认识和所学理论知识去寻找对象体系的各种影响及其各种因素,进而逐渐明确了其中各因素间存在的相互作用关系,并通过矩阵分析和有向图法把该系统结构中各有关因素先后细分为各种特征的构成层次,最后建立一种更为清晰明确的多层递阶结构模型<sup>[15]</sup>。通过解释结构模型,可将影响装备设计过程的各种因素分成了表面、中间层和深层三个维度,而各影响因素之间的相互联系关系及其影响范围,即可在该模型中得以更清晰直接的表达,因此,运用 ISM 方法构建装备测试性的影响因素模型较为合适。

根据解释结构模型的建模流程,装备测试性影响因素的 ISM 模型构建主要包括以下 4 个过程:

### 2.1 建立装备测试性影响因素间的邻接矩阵

邻接矩阵是用来准确简单描述装备测试性各因素间基本二元关系的矩阵。装备测试性中两个影响因素(行因素  $E_m$ 、列因素  $E_n$ )之间的相互具有传递性的关系即为二元关系<sup>[16]</sup>,其中两个因素间的关系可用矩阵元素  $E_{mn}$  来表示,各影响因素间的相互关系进行量化,用数字“1”和“0”表示各影响因素间的相互关系。如果行因素  $E_m$  对列因素  $E_n$  有影响,则  $E_{mn}=1$ ;如果行因素  $E_m$  对列因素  $E_n$  无影响,则  $E_{mn}=0$ 。

为了使构建的装备测试性影响因素邻接矩阵更加具有科学性和有效性,针对表 1 中各因素之间的相互关系,成立由 15 名领域专家所构成的研究小组开展了意见征询,考虑到专家看法中可能会存在意见不一致的现象,该研究选择了阈值为 0.8 来判断各种因素之间的逻辑关系,即在研

究队伍中如果有 12 或以上科学家认为行因素  $E_m$  直接影响了对应的列元素  $E_n$ ，则可判定结果为 1，否则为 0。据此，最终整理形成  $16 \times 16$  的装备测试性影响因素的邻接矩阵  $A$ ，如公式 (1) 所示：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 确定装备测试性影响因素间的可达矩阵

邻接矩阵充分地显示出装备测试性各因素间的直接关系，但是它却很难体现各因素间的间接关系，而可达矩阵可以直观地揭示装备测试性各因素间直接与间接的关系，很好地弥补了这一不足。其方法是在邻接矩阵计算公式的基础上加上一个单位矩阵，在推理与演算的过程中一般采用布尔代数运算 ( $0+0=0, 0+1=1, 1+1=1, 0 \times 0=0, 0 \times 1=0, 1 \times 1=1$ )，从而求得可达矩阵。

基于布尔代数运算的幂运算求得的装备测试性影响因素的可达矩阵  $B$ ，如公式 (2) 所示：

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.3 对可达矩阵进行级别划分

求解出装备测试的相关影响因素的可达矩阵时，必须按照可达集与先行集的等级划分，使各相关因素间的相互联系可以比较清晰地表达，在此基础上逐步建立解释结构模型。具体做法为：首先，将因素  $E_m$  的可达集设定为  $R(E_m)$ ，它是由可达矩阵中第  $m$  行中所有矩阵元素为 1 的列对应的要素集合，与此同时，将因素  $E_m$  的先行集设定为  $Q(E_m)$ ，它是由可达矩阵中第  $m$  列中所有矩阵元素为 1 的行对应的要素集合，如  $R(E_5) = \{5, 8, 9, 11, 12, 13\}$ ， $Q(E_5) = \{1, 3, 4, 5\}$ 。

然后，在可达集和先行集已知的基础上，对装备测试性的影响因素按照不同等级进行划分，将可达集  $R(E_m)$  和先行集  $Q(E_m)$  的共同集设定为  $A(E_m)$ ，即  $A(E_m) = R(E_m) \cap Q(E_m)$ 。

装备测试性相关影响因素的可达集、先行集与共同集如表 2 所示。

表 2 可达集、先行集与共同集

	可达集合 R	先行集合 Q	交集 $A=R \cap Q$
$E_1$	1,3,5,8,9,10,11,12,13,14,15,16	1	1
$E_2$	2,8,9,11,12	2	2
$E_3$	3,5,8,9,11,12,13,14,15,16	1,3	3
$E_4$	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	4	4
$E_5$	5,8,9,11,12,13	1,3,4,5	5
$E_6$	6,8,9,11,12,14	4,6	6
$E_7$	7,8,9,11,12	4,7	7
$E_8$	8,9,11,12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,13,14,15,16	8,9
$E_9$	8,9,11,12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,13,14,15,16	8,9
$E_{10}$	8,9,10,11,12,14,15	1,4,10	10
$E_{11}$	11	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16	11
$E_{12}$	12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16	12
$E_{13}$	8,9,11,12,13	1,3,4,5,13,16	13
$E_{14}$	8,9,11,12,14	1,3,4,6,10,14,16	14
$E_{15}$	8,9,11,12,15	1,3,4,10,15,16	15
$E_{16}$	8,9,11,12,13,14,15,16	1,3,16	16

备注：数字代表某要素，比如 2 代表  $E_2$ 。

当集合满足  $A(E_m) = R(E_m) \cap Q(E_m)$  或  $A(E_m) = R(E_m)$  时就是最高一级因素集合。如表 2 所示， $A(E_{11}) = R(E_{11})$ ， $A(E_{12}) = R(E_{12})$ ，因此，最高级要素即终止集要素为  $F(E) = \{E_{11}, E_{12}\}$ 。而后去掉这 2 个要素，再求剩余要素的可达集、先行集及共同集，直到得出最低一级的集合，即起始集。最后，在可达矩阵中先划去最高等级影响因素集合所在

的行和列,接着再在剩下的装备测试性影响因素可达矩阵里寻找最高级的影响因素集合。

## 2.4 得到 ISM 模型

根据级位划分,进行层次分解,从而得到装备测试性影响因素多级递阶结构模型,如图 1 所示。

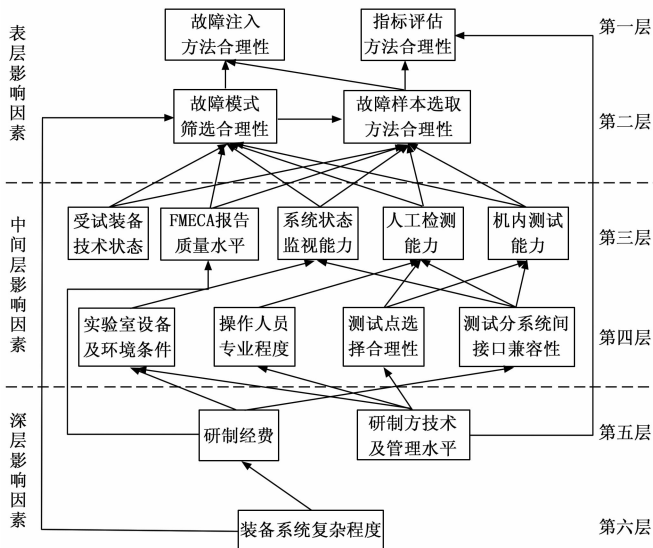


图 1 装备测试性水平影响因素多级递阶结构模型

根据 ISM 的层次递阶结构理论,对装备测试性水平 16 个影响因素进行更深层次的划分:

第一级和第二级为表层影响因素,是指可以直接作用于装备测试性水平的具体因素,包括故障模式筛选合理性、故障样本选取方法合理性、故障注入方法合理性和指标评估方法合理性<sup>[7]</sup>,这些因素可直接体现出测试性水平的高低,所处层级也是最低的,容易受到更高层次的因素影响,稳定性不强。

第三级和第四级为中层影响因素,这些因素既受深层影响因素的影响,又能直接作用于表层影响因素,包括测试分系统间接口兼容性、测试点选择合理性、实验室设备及环境条件、操作人员专业程度、受试装备技术状态、FMECA 报告质量水平、系统状态监视能力、人工检测能力和机内测试能力,主要起到联接表层和深层因素的纽带作用。

第五级和第六级为深层影响因素,包括装备系统复杂程度、研制方技术及管理水平和研制经费,这些因素所处层级最高,稳定性最强,是装备测试性水平的根本影响因素,是需要重点考虑和提出相应改善建议的因素。

通过对 16 个影响因素的深层次划分,可以找出其中在相关影响因素中对装备测试性水平影响大,较基础的因素。评判关键影响因素,本文采取“手段—目的分析”网络方法,以任一因素为起点,以装备测试性水平为终点,沿箭头寻求路径到达,然后求得每个因素作为起点抵达终点的路径数,最后计算各因素路径数的平均值,并按降序排列,高于平均值为关键影响因素,结果见表 3。

表 3 影响因素 ISM“手段—目的分析”网络节点路径数

序号	相关影响因素	$E_n$	路径数
1	装备系统复杂程度	$E_1$	30
2	研制方技术及管理水平和	$E_2$	25
3	研制经费	$E_4$	20
4	测试分系统间接口兼容性	$E_3$	15
5	测试点选择合理性	$E_5$	10
6	实验室设备及环境条件	$E_8$	5
7	操作人员专业程度	$E_{12}$	5
8	受试装备技术状态	$E_9$	5
9	FMECA 报告质量水平	$E_7$	5
10	系统状态监视能力	$E_{14}$	5
11	人工检测能力	$E_{10}$	5
12	机内测试能力	$E_{11}$	5
13	故障模式筛选合理性	$E_{13}$	3
14	故障样本选取方法合理性	$E_{15}$	2
15	故障注入方法合理性	$E_6$	1
16	指标评估方法合理性	$E_{16}$	1

平均路径数大约为 9,可得到装备测试性指标的关键影响因素为:装备系统复杂程度、研制方技术及管理水平和、研制经费、测试分系统间接口兼容性以及测试点选择合理性。

## 3 评价与建议

### 3.1 分析方法评价

为了验证通过 ISM 分析方法找出的装备测试性关键影响因素是否合理,还需要针对装备测试性影响因素的解释结构模型进行评价分析,常用的评价方法有层次分析法、网络分析法、模糊综合评判法、粗糙集等方法,本文采取层次分析法进行评价<sup>[17]</sup>。

层次分析法(AHP),是 20 世纪 80 年代由美国运筹学教授 T. L. Saaty 提出的一种快速、有效而又可靠的多要素决策方法。其基本过程是:综合考虑研究对象的各种社会性质和目标能力,提出一个能力总目标,然后逐步中将每个具体问题目标分别按若干个功能层次予以分解,通过对同一层次的诸多因素进行两两比较的方法,从而确定相对于上层目标的各自权重系数。这样层层分析,最终按它们各自针对总目标的重要性程度来进行最后的排序<sup>[18]</sup>。

运用 AHP 方法对装备测试性影响因素的解释结构模型进行评价分析的基本思路为:将装备测试性水平提高作为总目标,将受试装备自身、研制外部条件、具体实施方法和测试系统自身作为中间层要素,将装备系统复杂程度、受试装备技术状态等 16 个影响因素作为底层要素,构建基于装备测试性的评价指标体系,如图 2 所示。

然后通过处于同一目标层次之间的各个影响因素进行两两比较,确定它们相对于上一目标层的权系数。权系数需要通过专业领域的专家小组成员进行评价,设总目标为  $\mu$ ,对每一指标相对重要程度,采用 1~9 标度法进行两两比较。以总目标判断矩阵和具体实施方法判断矩阵为例,

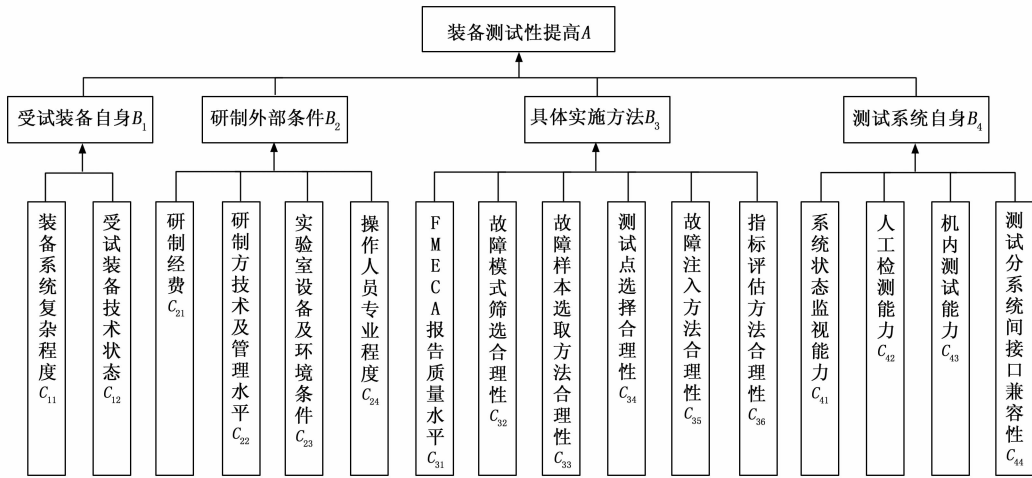


图 2 装备测试性评价指标体系

如表 4 和表 5 所示。

表 4 总目标判断矩阵

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
B <sub>1</sub>	1	1/3	3	2
B <sub>2</sub>	3	1	2	2
B <sub>3</sub>	1/3	1/2	1	1
B <sub>4</sub>	1/2	1/2	1	1

表 5 具体实施方法判断矩阵

B <sub>3</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>35</sub>	C <sub>36</sub>
C <sub>31</sub>	1	3	2	1/4	3	3
C <sub>32</sub>	1/3	1	2	1/5	3	3
C <sub>33</sub>	1/2	1/2	1	1/3	1/3	2
C <sub>34</sub>	4	5	3	1	1	5
C <sub>35</sub>	1/3	1/3	3	1	1	1
C <sub>36</sub>	1/3	1/3	1/2	1/5	1	1

表 6 装备测试性评价指标体系权重(总排序)

目标层	权重	准则层	权重	指标层	权重	总排序权重
A	1.0000	受试装备自身 B <sub>1</sub>	0.170 5	装备系统复杂程度 C <sub>11</sub>	0.768 5	0.131 0
				受试装备技术状态 C <sub>12</sub>	0.231 5	0.039 5
		研制外部条件 B <sub>2</sub>	0.343 3	研制经费 C <sub>21</sub>	0.291 0	0.099 9
				研制方技术及管理水准 C <sub>22</sub>	0.355 5	0.122 0
				实验室设备及环境条件 C <sub>23</sub>	0.185 6	0.063 7
				操作人员专业程度 C <sub>24</sub>	0.167 9	0.057 6
		具体实施方法 B <sub>3</sub>	0.267 4	FMECA 报告质量水平 C <sub>31</sub>	0.179 9	0.048 1
				故障模式筛选合理性 C <sub>32</sub>	0.152 3	0.040 7
				故障样本选取方法合理性 C <sub>33</sub>	0.137 8	0.036 8
				测试点选择合理性 C <sub>34</sub>	0.296 6	0.079 3
				故障注入方法合理性 C <sub>35</sub>	0.116 7	0.031 2
				指标评估方法合理性 C <sub>36</sub>	0.116 7	0.031 2
		测试系统自身 B <sub>4</sub>	0.218 9	系统状态监视能力 C <sub>41</sub>	0.191 4	0.041 9
				人工检测能力 C <sub>42</sub>	0.191 4	0.041 9
				机内测试能力 C <sub>43</sub>	0.191 4	0.041 9
				测试分系统间接口兼容性 C <sub>44</sub>	0.425 9	0.093 2

AHP 法是为各因素间两两比较，因而会出现判断不一致的情况，为保证结果有满意的一致性，需要对一致性指标进行检验。经检验，各判断矩阵的一致性指标 CR 均小于 0.1，因此满足一致性。

在各个判断矩阵的基础上，最终得到了装备测试性评价指标体系权重总排序，如表 6 所示。其权重总排序柱状图如图 3 所示。

通过运用 AHP 方法对装备测试性影响因素进行分析评价，最终得到了各个影响因素的权重总排序。结果表明，装备系统复杂程度、研制方技术及管理水准、研制经费、测试分系统间接口兼容性和测试点选择合理性这五个影响因素的权重相对较高，属于关键影响因素，这与装备测试性印象因素的解解释结构模型所得到的结果基本一致，因此，运用 AHP 评价方法证明了装备测试性影响因素的解解释结构模型分析方法的合理性。

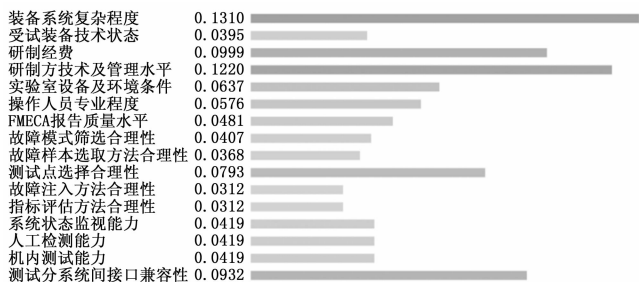


图 3 装备测试性评价指标体系权重柱状图

### 3.2 意见建议

本文通过对装备测试性影响因素分析,利用 ISM 方法,构建了装备测试性相关影响因素的解释结构模型,结果表明装备测试性水平相关影响因素可分为 6 个层级,其中装备系统复杂程度、研制方技术及管理水平、研制经费、测试分系统间接口兼容性以及测试点选择合理性处于本质因素层。因此,提高装备测试性水平,应注重以下 3 个方面。

1) 注重根据装备实际情况开展测试性设计。随着诸多高新技术的出现,装备自身系统,尤其是电子系统,也朝着复杂化和集成化的方向发展,使得系统的测试性评估和电子装备故障诊断的难度越来越大<sup>[19]</sup>,然而对于系统的测试时间、测试成本和测试效率等多项指标的要求在航天军事等重要领域却越来越苛刻,装备系统的复杂性已成为了影响装备测试性水平的最重要的因素,对此,我们在对装备进行测试性研制设计时,应该充分考虑具体装备的任务需求、所处环境条件等实际情况,针对装备系统的复杂程度设计与之相适合研制方案,以此来切实提高装备测试性水平。

2) 注重装备测试性的研制及投入。由于我国在装备测试性方面的研究起步较晚,目前主要应用领域正在由航空装备向航海和地面等装备慢慢推广,测试性知识尚不普及,而测试性作为一种设计特性,是和可靠性、维修性和保障性具有同等重要的地位<sup>[20]</sup>,因此,在下一代的装备研制中,在保证其他设计特性达到要求的前提下,可适当增加针对装备测试性设计的经费投入,同时也要注重研制单位和研制人员的专业培养,发展以测试性为核心的装备综合诊断技术来提升装备保障能力。

3) 注重测试性相关技术的创新与发展。伴随着科技的进步以及装备测试性受重视程度的提高,许多新技术、新方法都应用到了测试性之中,测试性经历了由外部测试到机内测试性,将来还会到智能 BIT 和预测与健康管理的不断发展过程,需要用到的诸如故障模式分析方法、故障注入技术、测点优化技术等相关知识也在日益完善与发展<sup>[21]</sup>,因此,在兼顾各测试分系统兼容性的同时,必须注重相关技术方法的不断创新,提高装备测试性水平,以适应新型装备不断提高的任务和性能要求,从而增强装备的战备完好性和安全性。

## 4 结束语

本文通过对装备测试性影响因素分析,利用 ISM 方法,构建了装备测试性水平相关影响因素的解释结构模型,运用“手段—目的的分析”方法识别出装备系统复杂程度、研制方技术及管理水平、研制经费、测试分系统间接口兼容性以及测试点选择合理性的分析 5 个影响装备测试性最关键的因素,并针对性提出了相关意见建议,为进一步提高装备测试性水平提供对策。

同时,本文对于装备测试性相关影响因素的研究仍存在着一定的局限性和片面性。例如,装备测试性影响因素复杂且繁多,而本文仅从装备测试性验证试验一个方面去分析装备测试性影响因素,使得研究稍欠缺些说服力。另外,作为一种定性定量相结合的分析方法,解释结构模型只是对装备测试性影响因素之间的互相关系进行了定量地计算和定性地分层,对于各影响因素间的结构机理却并未进行系统性深入研究。这使得往后的研究方向应着眼于从多个维度深入研究装备测试性影响因素,并结合各类具体装备测试性设计、试验和评估等多方面对各影响因素间的作用机制及其相关机理进行进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Department of Defense. Military standard testability program for systems and equipments. MIL-STD-2165A [S]. 1993.
- [2] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] GJB 2547A-2012. 装备测试性通用要求 [S]. 2012.
- [4] Department of Defense. Maintenance verification demonstration evaluation. U. S. Government Printing Office. MI-STD-471A [S]. 1973.
- [5] MIL-STD-785. Reliability program for systems and equipment development and production [S]. 1969.
- [6] MIL-STD-2165. Testability program for systems and equipments [S]. 1985.
- [7] HB 6437-1990. 电子系统和设备的可测试性大纲 [S]. 1990.
- [8] GJB 3385-98. 测试与诊断术语 [S]. 1998.
- [9] 史贤俊, 王康, 张文广, 等. 测试性验证技术现状分析及展望 [J]. 飞航导弹, 2018 (12): 80-86.
- [10] 袁剑平, 李近, 孙寒冰. 基于数字孪生的测试性验证技术 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 256-259.
- [11] 颜世刚, 齐亚峰. 测试性验证试验的故障注入方法优化研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 97-101.
- [12] 杨金鹏, 连光耀, 邱文昊. 装备测试性验证技术研究现状及发展趋势 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (2): 186-192.
- [13] 郭亚飞, 张璋, 刘力懂. 基于霍尔三维结构的试验鉴定理论体系研究 [D]. 北京: 中国航天系统科学与工程研究院, 2021.
- [14] 连光耀, 闫鹏程, 孙江生. 装备测试性验证与评价工程实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [15] 娄冬, 娄策群. 基于解释结构模型的老年人信息需求影响因素分析 [J]. 图书情报工作, 2018, 62 (7): 88-95.

(下转第 77 页)