

doi: 10.7690/bgzd.2024.10.006

## 可诊断性 3 维评价模型构建与综合评价方法

秦玉峰, 史贤俊

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对目前缺乏科学有效可诊断性评价指标体系的问题, 从故障诊断性能、响应时间、测试资源 3 个角度构建 3 维可诊断性评价模型。选择 10 个代表性指标作为评价模型的组成元素, 保证可诊断性评价模型的完备性; 提出基于组合权重和灰色关联分析 (grey relation analysis, GRA) 的可诊断性综合评价方法, 利用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和熵值法计算评价指标的主观权重和客观权重, 利用数学规划方法将主观权重和客观权重进行融合并利用 GRA 对系统的可诊断性水平进行评价。结果表明, 该方法能保证可诊断性评价结果的合理性和科学性。

**关键词:** 可诊断性; 评价模型; 灰色关联分析; 层次分析法; 熵值法

**中图分类号:** TJ07 **文献标志码:** A

## Construction of Three-dimensional Evaluation Model and Comprehensive Evaluation Method for Diagnosability

Qin Yufeng, Shi Xianjun

(College of Coastal Defense Force, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In view of the lack of scientific and effective diagnosability evaluation index system, a three-dimensional diagnosability evaluation model is constructed from three aspects of fault diagnosis performance, response time and test resources. Ten representative indexes are selected as the elements of the evaluation model to ensure the completeness of the diagnosability evaluation model; A comprehensive evaluation method of diagnosability based on combination weight and grey relation analysis (GRA) is proposed, in which analytic hierarchy process (AHP) and entropy method are used to calculate the subjective weight and objective weight of evaluation indexes. The mathematical programming method is used to integrate the subjective weight and objective weight, and the GRA is used to evaluate the diagnosability of the system. The results show that the method ensures the rationality and scientificity of the diagnosability evaluation results.

**Keywords:** diagnosability; evaluation model; grey relational analysis; AHP; entropy method

### 0 引言

可诊断性是指: 故障能够被确定地、有效地识别的程度<sup>[1]</sup>。其中: “确定地”要求每次系统发生故障时都能准确地对故障进行检测与隔离, 实质上强调的是诊断系统完成诊断任务的能力; “有效地”考虑的是诊断系统完成诊断任务的资源利用效率, 即要求对隔离故障所需的资源进行优化。可诊断性是系统的一种重要设计特性<sup>[2]</sup>。与测试性相比, 可诊断性从根本上反映了系统诊断故障的能力。系统具有良好的可诊断性能够使故障更容易被诊断, 有助于缩短维修时间, 节省诊断资源, 提高系统运行的安全性, 对保证系统的完好性以及任务成功性具有重要意义<sup>[3-6]</sup>。

由于目前尚未充分开展可诊断性优化设计工作, 因此, 对可诊断性评价模型构建问题的研究还比较少, 如何构建能够充分反映装备可诊断性水平的可诊断性评价模型是当前研究存在的主要问题之

一。作为装备的质量特性, 针对可靠性评价模型的研究相对较为充分。王自力<sup>[7]</sup>基于直升机装备的寿命剖面提出了阶段性可靠性指标体系; 李根成等<sup>[8]</sup>根据空空导弹的任务剖面 and 寿命剖面, 提出了适用于空空导弹的可靠性指标体系; 葛峰等<sup>[9]</sup>首先构造了无人机可靠性的评价指标体系, 然后构建了基于物元模型的可靠性评价模型; 祁旭东<sup>[10]</sup>构建了用于评价数控机床关键部件制造过程的可靠性评价模型。相比于可靠性, 测试性工作开展较晚, 测试性核心指标主要考虑故障检测率 (fault detection rate, FDR)、故障隔离率 (fault isolation rate, FIR) 和虚警率 (false alarm rate, FAR) 等具有统计意义的指标。朱力立等<sup>[11]</sup>在航空电子系统的总体设计阶段, 将 FDR、FIR 和 FAR 组合, 定义了测试性综合评价准则; 根据维修级别和测试手段的不同, 研究人员提出了相应的测试性指标体系, 主要包含外场级、野战级和后方级测试性指标体系, 机内测试 (built in

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-24

第一作者: 秦玉峰(1995—), 男, 黑龙江人, 博士。

test, BIT)、自动测试设备和所有测试手段测试性指标,同时还对不同的 BIT 模式和不同的隔离等级提出测试性指标要求<sup>[12-13]</sup>。

可诊断性评价过程中涉及多个因素及指标,可诊断性综合评价即综合多个指标的信息对装备可诊断性水平做出的一种综合判断。根据可诊断性的定义,系统的可诊断性主要从 2 方面体现:1) 实际的故障诊断效果;2) 实现目前故障诊断效果所需要的测试资源。因此,仅根据单一某项指标不能有效、全面地反映系统的可诊断性水平,故需要充分地选择能够反映系统可诊断性的评价指标,构建可诊断性评价模型。现有测试性工程中提出的评价指标不够全面,都仅考虑了 FDR 和 FIR 等指标,没有考虑故障诊断的准确率等因素,也没有充分考虑测试资源的利用效率。传统的 FDR 和 FIR 等评价指标无法体现实现故障诊断的难易程度,也不能有效地指导后续基于可诊断性的测试优化设计,限制了可诊断性研究的进一步发展和应用。

针对上述问题,笔者提出了可诊断性 3 维评价模型构建与综合评价方法,具体内容如下:首先从故障诊断性能、响应时间和测试资源 3 个角度选择了相应的可诊断性指标,对各项指标的含义进行了阐述;然后从这 3 个角度出发构建了可诊断性 3 维评价模型。在此基础上,研究了各项指标的权重计算方法 and 可诊断性综合评价方法,使该模型能够充分评价装备的可诊断性水平,从而为可诊断性优化设计奠定基础。

## 1 可诊断性 3 维评价模型

### 1.1 评价指标定义原则

为遵循可诊断性的基本概念,并保证科学性和规范性,所选择的评价指标应该遵守以下原则:

1) 代表性。所选取的指标必须具有代表性。一方面,与可诊断性相关的指标有很多,使用的指标过多将使评价过程过于繁琐,所以在选取指标时,只需选用部分实际应用较广泛的、重要性较高的指标来构成评价模型。另一方面,若选取的评价指标不具有代表性,那么最后评价结果是没有意义的,无法在实际中应用。

2) 全面性。所选取的指标必须能够全面地反映系统的可诊断性。若模型中仅包含单一方面的指标,则评价结果就不能综合评价系统的可诊断性水平,不利于设计者从整体角度评价设计方案的优劣。因此,可诊断性评价模型的构建需从可诊断性的基本

定义和概念出发,综合考虑能够反映可诊断性水平的各方面因素,这样评价结果才更具有可信度。

3) 独立性。每个指标应该单独评价一个特征,并且不同指标之间的相关程度不能过高,避免相似指标的重复计算。

4) 可行性。选择的指标应符合客观实际,获取过程简单,计算过程不能太过复杂。

### 1.2 评价指标选择

基于以上原则,笔者选择相应的可诊断性评价指标,如图 1 所示。

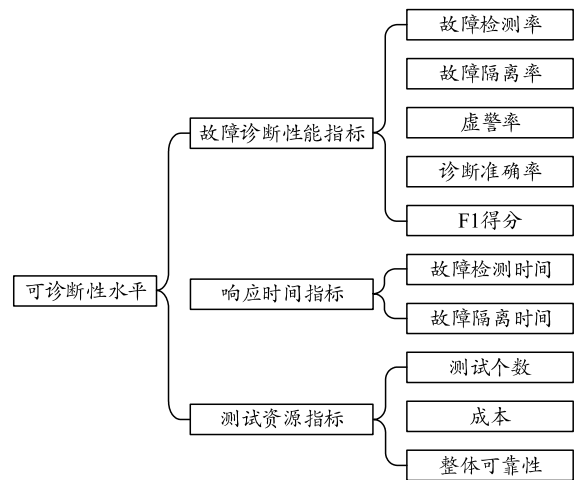


图 1 可诊断性指标

笔者针对评价系统可诊断性水平这一目标,确定了故障诊断性能、响应时间和测试资源 3 个二级指标和更为具体的 10 个三级指标,以下是各指标的定义和计算公式。

#### 1.2.1 故障诊断性能指标

1) 故障检测率 FDR: 在规定的时间内,能够被正确检测到的故障数  $N_D$  与被测单元发生的故障总数  $N$  之比。FDR 是指导系统可诊断性设计和评价系统可诊断性水平的必要指标之一。FDR 描述了系统的故障检测能力, FDR 越高,系统中能够被检测到的故障就越多。在可诊断性设计过程中应保证尽可能多的故障模式是可检测的。对于在 FDR 定义中的  $N_D$  与  $N$ ,可以通过相关性模型、故障模式的故障率来分析计算和预计,也可以进行故障注入实验通过统计得到。

2) 故障隔离率 FIR: 在规定的时间内,正确隔离到不大于规定可更换单元数  $L$  的故障数  $N_L$  与正确检测到的故障数  $N_D$  之比。FIR 描述了系统中故障被隔离的能力,其中:  $L$  为隔离组内的可更换单元数,也称为模糊度。一般来说,系统如果在较小的

$L$  下具有较高的 FIR, 那么表示故障的隔离越精准。如果故障是可以被隔离的, 那么说明该故障一定可以被检测的, 反之并不成立。如果检测出发生了故障, 但是不能被进一步隔离出发生故障的位置或发生的什么故障, 那么维修人员可能需要更换多个元件或需要额外的时间进行故障诊断, 影响任务执行, 也造成资源和时间的浪费; 因此, FIR 也是一个必要的可诊断性指标,  $L$  可以根据不同层次的诊断需求确定,  $N_L$  与  $N_D$ 、 $N$  的获取方法类似。

3) 虚警率 FAR: 在规定的时间内, 发生的虚警次数  $N_{FA}$  与同一时间内被测单元发生的故障总数  $N$  之比。其中: 虚警是指系统实际上不存在故障, 但是 BIT 电路指示有故障的情况。虚警会导致正常设备被误拆, 浪费人力物力, 增加不必要的保障工作。FAR 会导致大量无效的维修, 降低系统的战备完好性和任务成功率; 甚至当 FAR 过高时, 会令使用人员和维修人员不信任故障诊断系统给出的故障指示, 存在危险隐患。FAR 是反映可诊断性设计有效性的一个关键参数, 通常希望系统具有高 FDR 和 FIR, 同时 FAR 也不能过高, 否则高 FDR 和 FIR 是没有意义的。在使用中系统工程的各个阶段中也大多包含对 FAR 的要求。在设计中可通过设计合理的容差范围、提高故障诊断算法性能等措施来减少虚警发生的次数。

根据上述定义可知, FDR (FIR/FAR) 描述的是能被检测 (能被隔离/引起虚警) 的故障数占总故障数的比例, 本质上 FDR、FIR 和 FAR 更多是从整体的角度回答“故障模式是否能被检测 (能被隔离/存在虚警)”的问题。基于此, 笔者采用诊断准确率和 F1 得分这 2 个指标, 从单个故障模式的角度出发进一步评价系统的故障诊断性能。

4) 诊断准确率 (accuracy, Acc): 诊断正确的次数与总诊断次数之比。诊断准确率是一个用于评估诊断模型或诊断算法性能的指标。简单来说, 诊断准确率是指故障诊断模型诊断正确的结果所占的比例。准确率是一个很直观的评价指标, 通常来说, 诊断准确率越高, 说明故障诊断结果的正确次数越多, 所采用的可诊断性设计方案越好。

5) F1 得分: 兼顾精确率和召回率的评估指标。其中: 精确率的定义为在被诊断为故障的样本中, 实际为故障的比例。精准率和诊断准确率在定义上类似, 但实际上概念不完全相同。精准率表示故障样本的诊断准确程度, 而诊断准确率则代表整体的

诊断准确程度, 既包括故障样本, 又包括正常样本。召回率的定义为在所有故障样本中被正确诊断的比例, 衡量诊断模型对故障样本的识别能力, 召回率越高, 则故障诊断模型对故障样本的识别能力越强。

### 1.2.2 响应时间指标

上述 5 个指标可归类为故障诊断性能指标。在实际应用中, 快速的故障诊断能够保证后续决策的及时性。响应时间指标反映了执行特定诊断功能所花费的时间。响应时间指标的数值可根据实际使用期间的故障诊断或在试验期间向系统注入故障进行测量, 主要包括以下 2 种。

1) 平均故障检测时间 (mean fault detection time, MFDT)。从开始故障检测到给出故障指示所经历的时间。当采用在线检测时, MFDT 能够反映诊断系统对早期故障的敏感程度。MFDT 越短, 说明越早发现潜伏的早期故障, 可以避免其发展成为显著故障, 降低故障发生造成的危害; 当采用离线检测时, MFDT 反映了诊断系统检测故障的速度。MFDT 越短, 说明故障检测速度越快, 能够及时地进行后续的故障隔离和维修。因此, 必须在可诊断性设计过程中对 MFDT 提出指标要求。

2) 平均故障隔离时间 (mean fault isolation time, MFIT)。从开始故障隔离到给出故障隔离集合/算法的最终诊断输出结果所用的时间。如果对时间没有限制, 那么所有故障都能准确隔离, 但在实际中不可避免地存在各种限制和约束。更短的 MFIT 有利于后续的元件更换和维修操作, 能够提高可用性并降低维修时间。MFIT 通常在装备不能工作时间内占有较大的比例, 因此可诊断性设计应尽量降低系统的 MFIT。

### 1.2.3 测试资源指标

1) 测试个数  $n$ 。从理论上说, 如果在系统内所有可能的位置都设置测试, 那么系统的故障诊断性能一定能够达到最优。考虑到空间和成本的限制, 在所有可能的位置都设置测试显然不可能。考虑到可诊断性的定义, 应当在设置更少的测试情况下使得系统具有更好的故障诊断能力。

2) 成本指标  $C$ 。成本指标主要度量设计成本和后期维护成本。系统结构越复杂, 则软硬件的设计和维修成本越高。考虑到可诊断性的定义, 应当在成本花费尽可能低的情况下使得系统具有更好的故

障诊断能力。

3) 整体可靠性指标  $R$ 。考虑到测试点一般以 BIT 测试电路的形式进行放置, 过多的测试会增加系统的复杂程度, 并且测试电路本身也会发生故障; 因此, 测试个数和所设置的位置都会影响系统的整体可靠性。考虑到可诊断性的定义, 应当在整体可靠性尽可能高的情况下使得系统具有更好的故障诊断能力。

### 1.3 模型建立

根据上述分析, 可诊断性评价模型中的评价指标包含故障诊断性能指标、响应时间指标和测试资源指标 3 个类别; 因此, 可以根据这 3 类指标构建 3 维可诊断性评价模型, 如图 2 所示。

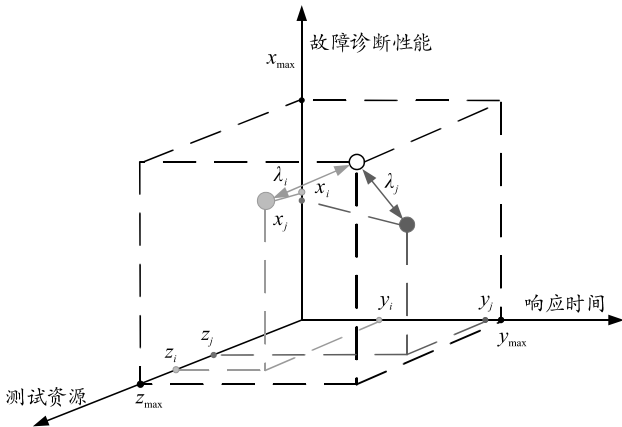


图 2 3 维可诊断性评价模型

上图中, 记第  $i$  个可诊断性设计方案下的故障诊断性能、响应时间和测试资源的指标评价结果分别为  $x_i$ 、 $y_i$  和  $z_i$ 。由于不同的指标重要程度不同, 因此不同的指标应当赋予不同的权重, 令每个二级指标的评价结果由其包含的三级指标数值线性表示:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \beta_x (\alpha_x^1 x_{i,1} + \dots + \alpha_x^5 x_{i,5}) \\ y_i &= \beta_y (\alpha_y^1 y_{i,1} + \alpha_y^2 y_{i,2}) \\ z_i &= \beta_z (\alpha_z^1 z_{i,1} + \alpha_z^2 z_{i,2} + \alpha_z^3 z_{i,3}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\beta_i$  为二级指标  $i$  所对应的权重,  $i=x, y, z$ ;  $\alpha_i^j$  为二级指标  $i$  中第  $j$  个三级指标所对应的权重。若取所有方案中的最优指标作为参考点, 则可得到当前最优指标评价结果:  $x_{max}$ 、 $y_{max}$  和  $z_{max}$ ; 因此, 第  $i$  个可诊断性设计方案下的系统可诊断性评价结果可由当前各项指标评价结果与当前最优指标评价结果之间的关联度  $\lambda_i$  进行表示:

$$\lambda_i = f((x_i, y_i, z_i), (x_{max}, y_{max}, z_{max})) \quad (2)$$

式中  $f$  为度量函数。可以发现  $\lambda_i$  与各项指标的权重

和关联度量函数  $f$  有关, 因此可以将可诊断性综合评价问题分解为以下 2 个子问题: 1) 求解各项指标权重; 2) 构造度量函数  $f$  计算当前指标与最优指标之间的关联度  $\lambda$ 。

基于以上分析, 笔者提出一种基于组合权重和 GRA 的可诊断性综合评价方法, 首先利用主观赋权结合客观赋权计算出各项指标的权重, 然后利用 GRA 对系统的可诊断性水平进行评价。

## 2 基于组合权重和灰色关联分析的综合评价

根据上述分析, 对系统的可诊断性水平进行评价需对指标进行赋权然后得出综合评价结果, 所以赋权方法尤其重要。赋权方法主要分为主观赋权和客观赋权。主观性赋权主要依据决策者的经验及对各指标的主观重视程度, 直接对各个指标进行评分并得出权重, 不考虑实际算例的指标数据。其计算过程比较简单, 但同时存在主观性较强的缺点, 所得结论容易与实际情况存在较大误差。相对地, 客观性赋权方法不涉及主观因素, 依靠对指标原始数据经过数学处理得出权重。其基本思想是利用各指标间的相互关系来确定指标权重数值。指标原始数据所包含的信息主要包括指标变化的信息差异和指标间的相互影响程度。客观性赋权方法具有很强的客观性并且准确度高, 但忽略了指标本身重要程度, 有时可能评价结果与预期的结果相差甚远。可以发现, 单独使用一种方法都会存在一定的不足。除了要充分分析实际数据所蕴含的信息外, 还必须结合主观性的经验判断, 做到主观与客观的合理结合, 两者互为补充。

在可诊断性设计之初, 尚不清楚各种设计方案下各项指标的具体数值, 相关数据较为匮乏。所以对于各项可诊断性指标的权重, 可利用专家或决策者对系统的评估与分析进行主观性赋权。在给出系统各项可诊断性指标达到的最低要求后, 以该要求为约束进行可诊断性优化设计, 得到初步的优化设计方案, 根据各方案的可诊断性指标具体数值, 便可以利用客观赋权法进行客观权重的计算, 并与主观权重相结合进行权重融合更新。

根据上述分析, 笔者为避免使用单一赋权方法存在的局限性, 基于层次分析法 (AHP) 确定指标的初始权重, 在得到初步的优化设计方案后, 利用熵值法进行客观权重的计算, 提出基于数学规划的组合赋权方法对主客观权重进行融合更新。在此基础上, 利用灰色关联分析 (GRA) 对各方案的权重进行

评价，求得各方案与当前最优情况的灰色关联度，关联度最高的方案即为当前最优设计方案。在之后的可诊断性增长设计过程中得到新的可诊断性设计方案，继续重复之前步骤，可以更新当前情况下的最优设计方案。

### 2.1 初始权重计算方法

AHP 已被广泛应用于系统分析、资源分配等各个领域<sup>[14]</sup>，利用 AHP 计算初始权重的步骤如下：

1) 分析指标属性，构造出层次化结构模型。

首先，对研究对象中的各个指标按照属性进行归类，构造层次化的分析结构模型，即确定目标层、因素层和指标层。其中：目标层为通过层次分析法求解目标问题所得的最终结果；准则层为目标问题所包含的不同评估准则；指标层为评估准则中所包含的具体目标。根据上述分析，可将不同级别的指标组成转化为层次化结果模型：系统的可诊断性水平为第 1 层，即目标层  $A$ ；所选取 3 个维度指标为第 2 层，即准则层  $B_1, B_2, B_3$ ；准则层中所包含的具体指标为第 3 层，即指标层  $C_1 \sim C_{10}$ 。

2) 构建评价指标的相对重要度判断矩阵。

通过建立层次化结构，确定了上下层元素之间的隶属关系。在此基础上，需进一步确定准则层及其支配元素的权重。AHP 预先构建一种评价指标相对重要度判断矩阵，对于目标层或因素层中的某个元素，该元素所包含下一层元素之间的重要程度采用 5 级标度法进行两两比对，利用同一层次对其上一层某元素的重要性评估值来求取该层次单排序权重。5 级标度法的标度含义如表 1 所示。

表 1 相对重要性标度及对应含义

相对重要性标度	含义
1	元素 $i$ 与元素 $j$ 的重要性相同
3	元素 $i$ 比元素 $j$ 稍微重要
5	元素 $i$ 比元素 $j$ 明显重要
2,4	当元素 $i$ 与元素 $j$ 介于上述判断之间的情况
倒数	元素 $i$ 和元素的相对重要性标度的倒数等于元素和元素 $i$ 的相对重要性标度

若评估  $n$  个元素  $a_1, \dots, a_n$  相互之间的重要度，首先将所有元素分别进行两两比较，元素  $i$  和元素  $j$  的相对重要度记为  $a_{ij}$ 。若元素  $i$  和元素  $j$  的重要度相等，则记  $a_{ij}$  为 1，如果元素  $i$  相比于元素  $j$  稍微重要则记  $a_{ij}$  为 3，其余情况以此类推。

根据表 1 相对重要性标度的含义和上述重要度判断矩阵构造方法，建立  $a_1, \dots, a_n$  的相对重要度判断矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中：矩阵主对角元素  $a_{ij}=1, i=1, \dots, n$ ，其余关于主对角对称的元素互为倒数。

3) 计算初始权重。

构建相对重要度判断矩阵  $A$  完毕后，求解判断矩阵  $A$  的最大特征值  $\xi_{\max}$  和对应的特征向量  $w=[w_1 \ \cdots \ w_n]^T$ ：

$$Aw = \xi_{\max} w \quad (4)$$

并对  $w$  进行归一化处理：

$$\left. \begin{aligned} \bar{w} &= [w_1^* \ \cdots \ w_n^*]^T \\ w_i^* &= w_i / \sum_{j=1}^n w_j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $w^*$  为各指标的初始权重。

4) 一致性检验。

如果  $A$  是一致的，则对于任意的  $i, j, k$  都有  $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$ 。当元素个数较多并考虑到决策者的主观影响时，判断矩阵  $A$  可能达不到一致性条件要求。但作为计算指标权重的依据，判断矩阵  $A$  必须具有大体上的一致性，不能过大地偏离一致性，否则无法保证  $w^*$  的可信度和准确性。例如：若评价元素  $i$  比元素  $j$  重要，元素  $j$  比元素  $k$  重要，而元素  $k$  又比元素  $i$  重要，这样的条件本身互相矛盾的，无法判断所得结果是否是可信的、准确的；因此，需对所得指标权重进行一致性检验，具体方法为：

$$CI = (\xi_{\max} - n) / (n - 1); \quad (6)$$

$$CR = CI / RI \quad (7)$$

式中：CI 为一致性校验指标；RI 为平均随机一致性指标；CR 为一致性评判指标。当  $CR < 0.1$  时，即认为矩阵  $A$  满足一致性，否则需要重新设计评判矩阵  $A$ 。表 2 给出了 1~5 阶矩阵的 RI 取值表。

表 2 平均随机一致性指标取值

$n$	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.514 9	0.893 1	1.118 5

### 2.2 客观权重计算方法

在获得可诊断性设计方案后，可根据设计方案的各种指标数值计算客观权重以增加权重的准确性。笔者采用熵值法计算客观权重的计算。熵值法的基本思路是根据指标的离散程度大小来确定客观

权重。一般来说,若某个指标的信息熵越小,表明指标提供的信息量越多,应该赋予较大的权重。相反,某个指标的信息熵越大,表明指标提供的信息量越少,应该赋予较小的权重。如果某项指标的值全部相等,则该指标在综合评价中不起作用<sup>[15]</sup>。熵值法根据数据所提供的信息量进行计算,避免了人为因素所造成的偏差,精度较高且客观性更强,能够更好地解释所得到的结果。假设共有  $m$  个方案、 $n$  个指标,则可以构造指标参数矩阵  $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $x_{ij}$  为第  $j$  个指标  $x_j$  在第  $i$  个方案中的数值。由于不同的指标可能量纲不同,指标量纲不一致会造成不同指标的数据有大有小从而影响计算结果。首先需要分析指标为正向指标还是逆向指标,其中:指标数值越高评价越好的指标为正向指标,指标数值越低评价越好的指标为逆向指标。为消除量纲的影响,对数据进行标准化处理:

$$\left. \begin{aligned} x_{ij}^* &= \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} && x_j \text{ 为正向指标} \\ x_{ij}^* &= \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} && x_j \text{ 为逆向指标} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

然后计算  $x_{ij}^*$  所占的比重:

$$p_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{i=1}^m x_{ij}^* \quad (10)$$

计算指标  $x_j$  的信息熵:

$$E_j = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} / \ln m \quad (11)$$

式中  $E_j \geq 0$ ; 若  $p_{ij}=0$ , 则定义  $E_j=0$ 。

通过信息熵计算信息效用值  $d_j$  和各指标的权重  $v_i^*$ :

$$d_j = 1 - E_j; \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= [v_1^* \quad \cdots \quad v_n^*]^T \\ v_i^* &= d_i / \sum_{j=1}^n d_j \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

### 2.3 权重组合方法

虽然客观赋权法相比主观赋权法有较强的数学理论依据,但使用主观赋权法也是必要的。一是因

为客观赋权法需要实际指标数据,在设计之初可能数据不充足甚至没有数据,此时必须利用主观赋权法计算初始权重;二是因为主观赋权法从一定程度上包含着设计者的历史经验,能够起到一定的指导作用。必须充分结合两者的优势。考虑到上述问题,笔者利用数学规划方法将主观权重和客观权重进行融合,提高所得权重的科学合理性。

根据上述分析,记:利用层次分析法所得主观权重为  $w$ ,利用熵值法所得客观权重为  $v$ ,那么就可以得到一个关于  $w$  和  $v$  的线性组合:

$$u = \alpha_1 w + \alpha_2 v \quad (14)$$

式中:  $u$  为组合权重;  $\alpha_1 > 0$ ,  $\alpha_2 > 0$  为线性组合权重系数。

利用最小二乘法思想对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  进行优化,使得  $u$  与  $w$  和  $v$  的偏差最小,可确定如下优化模型:

$$\left. \begin{aligned} \min \|u - w\|_2 \\ \min \|u - v\|_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

根据矩阵微分性质,式(15)成立的条件为:

$$\left. \begin{aligned} \partial \|u - w\|_2 / \partial \alpha_1 = 0 \\ \partial \|u - v\|_2 / \partial \alpha_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

通过计算可得:

$$\left. \begin{aligned} \|u - w\|_2^2 &= \alpha_1^2 w^T w + \alpha_2^2 v^T v + 2\alpha_1 \alpha_2 w^T v - \\ &2\alpha_1 w^T w - 2\alpha_2 v^T v + w^T w \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

因此式(16)等价于:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 w^T w + \alpha_2 w^T v = w^T w \\ \alpha_1 v^T w + \alpha_2 v^T v = v^T w \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

根据式(18)可构造如下线性方程组:

$$\begin{bmatrix} w^T w & w^T v \\ v^T w & v^T v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w^T w \\ v^T v \end{bmatrix} \quad (19)$$

求解上述方程组能够得到最优线性组合系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  进行归一化处理之后,得到组合赋权的综合权重为:

$$u = \alpha_1^* w + \alpha_2^* v \quad (20)$$

式中:  $\alpha_1^* = \alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$ ,  $\alpha_2^* = \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$ 。

### 2.4 基于灰色关联分析的可诊断性综合评价

GRA 来自于灰色系统理论,是一种多因素统计分析的方法。GRA 利用灰色关联度来量度因素之间变化趋势的相似或相异程度。如果 2 个因素的数据变化趋势一致性高,那么这 2 个因素的关联程度较强,灰色关联度就大,否则灰色关联度就小<sup>[16]</sup>。笔者利用 GRA 评价可诊断性水平,首先构造最优指

标参考数列，然后计算各方案中指标与最优指标的灰色关联系数，并将各指标的组合权重  $u$  与灰色关联系数相结合，求得各方案与最优方案的灰色关联度。所得结果表示各方案与所构造最优方案之间的距离，因此设计者能够通过灰色关联度数值大小确定各方案的优劣排名。具体计算过程如下：

### 1) 指标数据正向化处理。

对于逆向指标  $x$ ，需要在进行 GRA 之前将其转化为正向指标。对各指标进行分析可得 FDR, FIR, Acc 和 F1 得分为正向指标，其余指标为逆向指标。若所有的逆向指标都为正数，则可以采用如下公式进行计算：

$$\bar{x}_{ij} = |x_{ij} - \max x_j|。 \quad (21)$$

### 2) 数据标准化。

将指标正向化处理后得到式(8)形式的指标参数矩阵  $\mathbf{X}$ 。标准化的目的是为了消除量纲影响，其过程与式(9)一致。将经过上述两步处理的矩阵记为：

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}。 \quad (22)$$

### 3) 构造参考序列。

提取各个指标的最优值，即在矩阵  $\mathbf{Z}$  的每一列中取出最大值构成参考序列，作为当前理论上的最优指标，记为  $z_0$ 。另外，将矩阵  $\mathbf{Z}$  中的第  $i$  行  $z_i$  记为第  $i$  个比较序列。

### 4) 计算比较序列与参考序列的灰色关联系数。

定义比较序列  $z_i$  与参考序列  $z_0$  的灰色关联矩阵为  $\theta$ ， $\theta$  内元素可由以下公式进行计算：

$$\theta_{ij} = \theta(z_0(j), z_{ij}) = (a + \rho b) / (|z_0(j) - z_{ij}| + \rho b)。 \quad (23)$$

式中： $\theta_{ij}$  为  $\theta$  内第  $i$  行第  $j$  列元素； $a = \min_i \min_j |z_0(j) - z_{ij}|$ ； $b = \max_i \max_j |z_0(k) - z_{ij}|$ ； $\rho$  为分辨系数，一般取 0.5。

### 5) 计算关联度。

根据组合权重  $u$  与灰色关联系数矩阵  $\theta$ ，计算第  $i$  个方案与参考序列的关联度  $\lambda_i$  为：

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n u(j) \theta_{ij}。 \quad (24)$$

$\lambda_i$  取值最大的方案中各项指标与所构造的最优方案距离最近，因此认为  $\lambda_i$  取值最大的方案为当前的最佳方案。

## 3 算例分析

### 3.1 初始权重

#### 3.1.1 二级指标初始权重

通过结合实际情况与专家经验，做出二级指标重要度排序分析：可诊断性设计的根本目的是保证系统具有良好故障诊断性能的情况下，利用更少的测试资源，同时具有较低的故障诊断难度。诊断性能指标是核心指标，其重要度应放在第 1 位；测试资源指标反映了系统整体设计水平，而响应时间指标除了与所设计的故障诊断算法有关外，也受到测试点个数和位置的影响。分别将测试资源指标和响应时间指标的重要度放在第 2 位和第 3 位。根据 5 级标度法的评分条件对二级指标进行评分，结合式(3)得出二级指标的判断矩阵  $\mathbf{A}_2$  为：

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (25)$$

根据式(4)和(5)计算判断矩阵  $\mathbf{A}_2$  的最大特征根  $\xi_{2,\max}$  和其对应的特征向量  $\mathbf{w}_{2,\max}$  分别为： $\xi_{2,\max} = 3.0037$ ， $\mathbf{w}_{2,\max} = [0.928 \quad 0.1747 \quad 0.3288]^T$ 。由于  $n=3$ ，根据表 2 查得  $RI=0.5149$ ，根据式(6)和(7)计算可得： $CI=0.0018$ ， $CR=0.0036 < 0.1$ ， $\mathbf{A}_2$  满足一致性要求。对  $\mathbf{w}_{2,\max}$  归一化处理得到二级指标的初始权重为： $\mathbf{w}_2^* = [0.6483 \quad 0.1220 \quad 0.2297]^T$ 。

#### 3.1.2 三级指标初始权重

##### 1) 故障诊断性能指标。

FDR 和 FIR 是描述整个系统故障可诊断性能的必要指标，因此，FDR 和 FIR 重要度排序分别为第 1 位和第 2 位；F1 得分衡量诊断模型寻找故障样本的能力，将其排在第 3 位；FAR 是反映可诊断性设计有效性的一个关键参数，系统具有良好诊断效果的同时 FAR 也不能过高，因此将 FAR 排在第 4 位；Acc 排在第 5 位。构建诊断性能指标的判断矩阵  $\mathbf{A}_{31}$  为：

$$\mathbf{A}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 & 5 & 4 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/4 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (26)$$

根据前文所述方法计算判断矩阵  $\mathbf{A}_{31}$  的最大特

征根  $\xi_{31,max}=5.237 5$  和其对应的特征向量： $w_{31,max}=[0.7621 \ 0.5492 \ 0.2148 \ 0.1076 \ 0.2446]^T$ 。由于  $n=5$ ，根据表 2 查得  $RI=1.118 5$ ，根据式(6)和(7)计算可得： $CI=0.059 4$ ， $CR=0.053 1 < 0.1$ ， $A_{31}$  满足一致性要求，所以二级指标  $B_1$  下的三级指标初始权重为  $\xi_{31,max}$ ，归一化处理后所得结果： $w_{31}^*=[0.4057 \ 0.2924 \ 0.1144 \ 0.0573 \ 0.1302]^T$ 。

2) 响应时间指标。

考虑到 MFDT 不仅能够反映故障检测的速度，而且反映了对早期故障的敏感程度，因此 MFDT 的重要度稍比 MFIT 高。构建响应时间指标的判断矩阵  $A_{32}$  为：

$$A_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

进而求得  $A_{32}$  的最大特征根  $\xi_{32,max}=2$  和其对应的特征向量  $w_{32,max}=[0.9487 \ 0.3162]^T$ 。由于二阶矩阵总是满足一致性，所以二级指标  $B_2$  下的三级指标初始权重为： $w_{32}^*=[0.7500 \ 0.7500]^T$ 。

3) 测试资源指标。

由于测试个数在一定程度上能够影响成本和可靠性，因此将其重要度排在第 1 位；整体可靠性直接影响系统的使用，因此将其重要度排在第 2 位。成本主要包括设计成本、安装成本和后期维护成本，将其重要度排在第 3 位。构建响应时间指标的判断矩阵  $A_{33}$  为：

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/4 \\ 1/3 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据前文所述方法计算判断矩阵  $A_{33}$  的最大特征根  $\xi_{33,max}=3.085 8$  和其对应的特征向量  $w_{33,max}=[0.9048 \ 0.1352 \ 0.4038]^T$ 。进而根据式(6)和(7)计算可得： $CI=0.042 9$ ， $CR=0.083 3 < 0.1$ ， $A_{33}$  满足一致性要求，所以二级指标  $B_3$  下的三级指标初始权重为  $w_{33,max}$  归一化处理后所得结果：

$$w_{33}^*=[0.6267 \ 0.0936 \ 0.2797]^T \quad (29)$$

上述所求三级指标初始权重是在相应的二级指标下进行计算的，不利于后续计算；因此，将三级指标权重的数值由相对于二级指标转化为相对于一级指标。以  $w_{31}^*$  为例，将  $w_{31}^*$  转化一级指标  $A$  下的权重：

$$\bar{w}_{31}^* = w_{31}^*(1) \times w_{31}^* = 0.6483 \times [0.4057 \ 0.2924 \ 0.1144 \ 0.0573 \ 0.1302]^T = [0.2630 \ 0.1896 \ 0.0742 \ 0.0371 \ 0.0844]^T \quad (30)$$

同理，将  $w_{32}^*$  和  $w_{33}^*$  分别转化为一级指标  $A$  下的权重：

$$\bar{w}_{32}^* = [0.0915 \ 0.0305]^T; \quad (31)$$

$$\bar{w}_{33}^* = [0.1440 \ 0.0215 \ 0.0642]^T \quad (32)$$

因此，在一级指标  $A$  下 10 个三级指标的初始权重分别为：

$$\bar{w} = [\bar{w}_{31}^* \ \bar{w}_{32}^* \ \bar{w}_{33}^*]^T = [0.2630 \ 0.1896 \ 0.0742 \ 0.0371 \ 0.0844 \ 0.0915 \ 0.0305 \ 0.1440 \ 0.0215 \ 0.0642]^T \quad (33)$$

3.2 客观权重

若在设计过程中存在 6 个可能的可诊断性设计方案，各方案的可诊断性指标数值如表 3 所示。

表 3 各设计方案的指标数值

指标	1	2	3	4	5	6
FDR	0.98	1.00	0.97	0.90	0.92	0.95
FIR	0.82	0.88	0.86	0.85	0.88	0.90
FAR	0.01	0.05	0.01	0.02	0.01	0.03
Acc	0.93	0.90	0.91	0.88	0.88	0.91
F1 得分	0.87	0.94	0.92	0.89	0.82	0.86
MFDT	0.42	0.69	0.37	0.22	0.14	0.38
MFIT	0.89	1.57	0.95	0.84	0.47	0.61
$n$	8.00	10.00	7.00	8.00	6.00	7.00
$C$	7.80	9.60	7.30	8.40	6.70	7.50
$R$	8.20	10.70	7.90	8.00	7.50	7.30

利用上表中各方案的指标数据可以构造指标参数矩阵  $X$ ，然后利用式(9)进行数据标准化可得：

$$X^* = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.00 & 1.00 & 1.00 & 0.42 \\ 1.00 & 0.75 & 0.00 & 0.40 & 1.00 \\ 0.70 & 0.50 & 1.00 & 0.60 & 0.83 \\ 0.00 & 0.38 & 0.75 & 0.00 & 0.58 \\ 0.20 & 0.75 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.50 & 1.00 & 0.50 & 0.60 & 0.33 \\ 0.62 & 0.50 & 0.50 & 0.62 & 0.74 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.58 & 0.56 & 0.75 & 0.79 & 0.82 \\ 0.85 & 0.66 & 0.50 & 0.41 & 0.79 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.94 \\ 0.56 & 0.87 & 0.75 & 0.72 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (34)$$

根据式(10)和(11)能够计算得到各指标的信息熵为：



$$E = \begin{pmatrix} 0.8406 & 0.8685 & 0.8815 & 0.7440 & 0.8545 \\ 0.8773 & 0.8849 & 0.8787 & 0.8770 & 0.8948 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

根据式(12)和(13)计算得到各指标的权重为：

$$\bar{v} = [0.1140 \quad 0.0940 \quad 0.0847 \quad 0.1831 \quad 0.1040 \quad 0.0878 \quad 0.0823 \quad 0.0868 \quad 0.0879 \quad 0.0752]^T. \quad (36)$$

### 3.3 组合权重

构造如下线性方程组：

$$\begin{bmatrix} \bar{w}^T \bar{w} & \bar{w}^T \bar{v} \\ \bar{v}^T \bar{w} & \bar{v}^T \bar{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{w}^T \bar{w} \\ \bar{v}^T \bar{v} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

根据之前所求得的主观权重  $\bar{w}$  和客观权重  $\bar{v}$  可得：

$$\begin{bmatrix} 0.1537 & 0.0994 \\ 0.0994 & 0.1088 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1537 \\ 0.1088 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

求解上述方程组可得： $\alpha_1 = 0.8640$ ， $\alpha_2 = 0.2103$ 。

对  $\alpha_1, \alpha_2$  进行归一化处理： $\alpha_1^* = 0.8042$ ， $\alpha_2^* = 0.1958$ 。

则组合权重为：

$$u = \alpha_1^* \bar{w} + \alpha_2^* \bar{v} = [0.2338 \quad 0.1709 \quad 0.0763 \quad 0.0657 \quad 0.0882 \quad 0.0908 \quad 0.0406 \quad 0.1328 \quad 0.0345 \quad 0.0664]^T. \quad (39)$$

### 3.4 可诊断性评价

针对指标参数矩阵  $X$ ，利用式(21)将其中的逆向指标转化为正向指标，进行数据标准化后可以得到如下形式的指标参数矩阵  $Z$ ：

$$Z = \begin{bmatrix} 1.03 & 0.95 & 1.41 & 1.03 & 0.98 \\ 1.05 & 1.02 & 0.00 & 1.00 & 1.06 \\ 1.02 & 0.99 & 1.41 & 1.01 & 1.04 \\ 0.94 & 0.98 & 1.06 & 0.98 & 1.01 \\ 0.97 & 1.02 & 1.41 & 0.98 & 0.93 \\ 1.00 & 1.04 & 0.71 & 1.01 & 0.97 \\ 0.84 & 1.00 & 0.86 & 1.05 & 1.03 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.91 & 1.29 & 1.34 & 1.15 \\ 1.47 & 1.07 & 0.86 & 0.70 & 1.11 \\ 1.72 & 1.61 & 1.71 & 1.69 & 1.32 \\ 0.97 & 1.41 & 1.29 & 1.22 & 1.40 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

在矩阵  $Z$  的每一列中取最大值构成参考序列：

$$z_0 = [1.05 \quad 1.04 \quad 1.41 \quad 1.03 \quad 1.06 \quad 1.72 \quad 1.61 \quad 1.71 \quad 1.69 \quad 1.40]. \quad (41)$$

则可计算得到  $a=0.0005$ ， $b=1.7200$ 。根据公式计算求得灰色关联矩阵  $\theta$ 。根据组合权重  $u$  与灰色关联矩阵  $\theta$ ，计算 6 个方案比较序列与参考序列的灰色关联度，如图 3 所示。

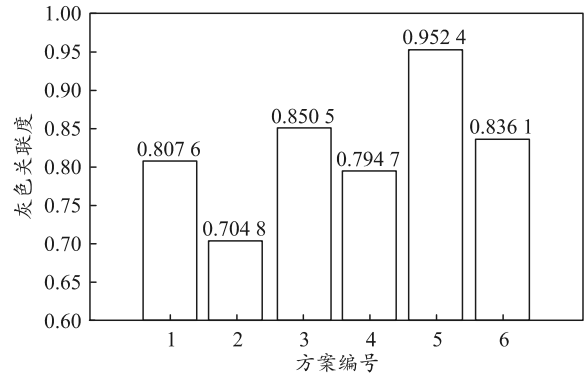


图 3 各方案的评价结果

根据计算结果可知，方案 5 的关联度为取 0.9524 为最大值，即：方案 5 中各项指标与所构造的最优方案距离最近，因此认为方案 5 为当前的最佳方案。若经过反馈优化设计后，得到了新的方案 7，方案 7 的各项指标数据分别为：

$$\begin{pmatrix} 0.94 & 0.90 & 0.01 & 0.89 & 0.85 \\ 0.16 & 0.52 & 6.00 & 6.70 & 7.50 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

可以发现，相比于方案 5，方案 7 在不改变测试资源指标的情况下，通过改进故障诊断算法提高了诊断性能指标，但同时响应时间也略有增加。此时利用前文所述方法求取新的客观权重为：

$$\bar{v}' = [0.1134 \quad 0.0903 \quad 0.0792 \quad 0.1980 \quad 0.1164 \quad 0.0843 \quad 0.0782 \quad 0.0842 \quad 0.0848 \quad 0.0702]^T. \quad (43)$$

根据式(19)可以计算得到更新后的最优线性组合系数分别为： $\alpha_1' = 0.8185$ ， $\alpha_2' = 0.2826$ 。对  $\alpha_1', \alpha_2'$  进行归一化处理： $\alpha_1'^* = 0.7434$ ， $\alpha_2'^* = 0.2566$ 。则更新后的组合权重为：

$$u' = \alpha_1'^* \bar{w} + \alpha_2'^* \bar{v}' = [0.2246 \quad 0.1644 \quad 0.0755 \quad 0.0784 \quad 0.0926 \quad 0.0896 \quad 0.0427 \quad 0.1286 \quad 0.0378 \quad 0.0657]^T. \quad (44)$$

由于指标参数矩阵也进行了更新，因此构造新的参考序列。之后计算此时各方案与新参考序列的灰色关联度，如图 4 所示。

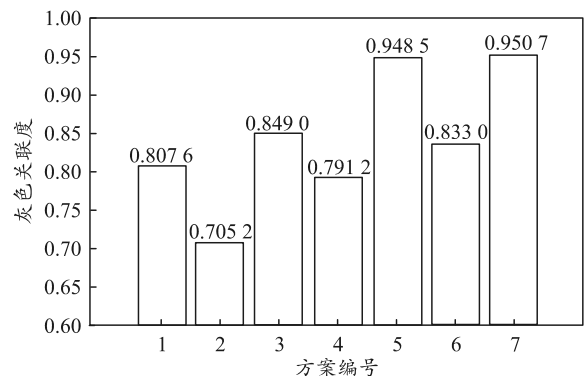


图 4 更新后的各方案评价结果

根据计算结果可知,此时方案 7 的灰色关联度大于方案 5,因此认为方案 7 为更新后的最佳方案。

#### 4 结束语

针对目前缺乏科学有效的可诊断性评价指标体系的不足,构建了可诊断性 3 维评价模型,并提出一种系统可诊断性水平综合评价方法对可诊断性评价模型进行求解,研究工作和主要结论如下:

1) 分析了可诊断性指标的定义原则,从故障诊断性能、响应时间、测试资源 3 个角度,构建了 3 维可诊断性评价模型,选择了具有代表性的 10 个可诊断性评价指标,保证了可诊断性评价结果的科学性和合理性。

2) 提出了基于组合权重和 GRA 的可诊断性评价方法。分别利用 AHP 和熵值法计算可诊断性评价指标的初始主观权重和预计客观权重,并利用数学规划方法将主观权重和客观权重进行融合。介绍了 GRA 的基本步骤和基于 GRA 的可诊断性水平评价方法。该方法基于组合权重和指标数值对系统可诊断性进行综合评价,并且该方法能够利用后续试验或实际诊断数据对各项指标的权重进行更新,进而不断更新最优可诊断性设计方案,为后续研究打下基础。

#### 参考文献:

- [1] IEEE Trial-use standard for testability and diagnosability characteristics and metrics[S]. IEEE Standard 1522, 2004.
- [2] 王大轶,符方舟,刘成瑞,等. 控制系统可诊断性的内涵与研究综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1537-1553.
- [3] WANG D Y, FU F Z, LIW B, et al. A review of the diagnosability of control systems with applications to spacecraft[J]. Annual Reviews in Control, 2020, 49: 212-229.
- [4] 刘文静,李文博,张秀云,等. 基于图论的深空探测航天器故障可诊断性评价[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(12): 2074-2084.
- [5] 蒋栋年,李炜,王君,等. 基于故障可诊断性量化评价的传感器优化配置方法研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(6): 1128-1137.
- [6] 化永朝,李清东,任章,等. 连续系统故障可诊断性评价方法综述[J]. 控制与决策, 2016, 31(12): 2113-2121.
- [7] 王自力. 直升机可靠性、维修性指标研究[J]. 航空学报, 1995, 16(S1): 20-27.
- [8] 李根成,姜同敏. 空空导弹可靠性指标体系研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 88-92.
- [9] 葛峰,韩建立,林云,等. 基于 AHP-可拓学的无人机可靠性综合评价模型研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 172-175.
- [10] 祁旭东. 面向数控机床关键部件制造过程的可靠性综合评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [11] 朱力立,李庄生,许宗泽. 飞机综合航电系统总体设计综合评估方法[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 685-689.
- [12] 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, 2003: 28-29.
- [13] 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: 33-36.
- [14] 李云冲. 基于 AHP 与灰色关联分析的汽车零部件供应商选择研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [15] 罗洋. 基于 AHP-熵权法的综合能源系统多指标评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [16] 王太良. 基于灰色关联分析的稳健设计方法及应用研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2021.