

doi: 10.7690/bgzd.2023.07.018

基于 AHP 熵权-物元分析法的虚拟维修考核评价

王海涛¹, 翟仕奇^{1,2}, 孙志丹¹, 王涛³, 高翔²

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 南京 210007; 2. 中国人民解放军 31619 部队, 江苏 镇江 212421;
3. 中国人民解放军 32228 部队, 南京 210039)

摘要: 为准确评价虚拟维修训练水平, 构建包含 4 项准则 36 项指标的虚拟维修考核评价模型。基于物元分析法, 结合层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和熵权法 (entropy weight method, EWM) 进行组合赋权, 通过实例计算待评对象的虚拟维修训练等级, 验证了模型的有效性。结果表明: 运用组合赋权法确定的指标权重科学合理, 能避免权重确定的绝对主观性和绝对客观性; 物元分析评价模型为虚拟维修考核研究提供了一种新的评价方法, 对虚拟训练系统的考核设计具有借鉴价值。

关键词: 虚拟维修; 层次分析法; 熵权法; 组合赋权; 物元分析法

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Evaluation of Virtual Maintenance Based on AHP Entropy Weight and Matter Element Analysis

Wang Haitao¹, Zhai Shiqi^{1,2}, Sun Zhidan¹, Wang Tao³, Gao Xiang²

(1. College of Field Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China;
2. No. 31619 Unit of PLA, Zhenjiang 212421, China; 3. No. 32228 Unit of PLA, Nanjing 210039, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the level of virtual maintenance training, a virtual maintenance assessment and evaluation model including 4 criteria and 36 indicators was established. Based on the matter-element analysis method, the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM) were combined to determine the weight, and the virtual maintenance training level of the object to be evaluated was calculated through an example to verify the effectiveness of the model. The results show that the index weight determined by the combination weighting method is scientific and reasonable, which can avoid the absolute subjectivity and objectivity of weight determination; the matter-element analysis evaluation model provides a new evaluation method for virtual maintenance assessment research, and has reference value for the assessment design of virtual training system.

Keywords: virtual maintenance; analytic hierarchy process; entropy weight method; combination weighting; matter-element analysis method

0 引言

随着人工智能、传感器和虚拟仿真等新技术的快速发展, 基于虚拟现实的装备虚拟维修系统以各种形态、载体进入装备维修保障领域, 并快速应用^[1-3]。当前, 虚拟维修训练主要有层次分析法 (AHP)、熵权法 (EWM)、模糊综合评价法、灰色关联度法等评价方法^[4]。

朱自伟^[5]在发动机虚拟维修系统设计中选用模糊综合评定法, 设定了故障定位、故障诊断、关键操作及维修工具使用等评定指标; 张琦等^[6]以某型电源装备虚拟训练系统为研究对象, 提出基于组合赋权和模糊灰色聚类相结合的综合评价方法; 张爽等^[7]以时效、工艺、规程等为评价准则提出层次分析法和熵权法组合赋权的虚拟维修评价方法; 徐一

麟^[8]模糊运用灰色关联度法和模糊综合评价法建立数学模型作为虚拟维修操作能力的评价方法; 谢晖等^[9]基于虚拟仿真课程前期大数据分析, 构建了“行为-能力”双模态智能评价模型进行量化评价。

这些方法能够解决虚拟维修考核评价的基本问题, 但都存在一定的局限性。当前虚拟维修系统评价指标的考虑因素主要有操作熟练度、操作准确度、理论考核成绩、日常表现等, 每个系统的评价指标体系各不相同、层次不齐, 缺少一个系统完善的评价指标模型。AHP 主要依靠专家们自身的经验判断, 主观性较大^[10]; EWM 不依赖于人的主观性, 而是通过挖掘数据本身, 通过计算各项指标的变异程度为多指标综合评价提供权重依据, 客观性较强^[11]; 物元分析法是为解决不相容问题, 通过定

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-04-23

作者简介: 王海涛 (1978—), 男, 安徽人, 硕士, 副教授, 从事工程装备虚拟仿真与虚拟维修研究。E-mail: 1193603916@qq.com。

性与定量的判断建立物元评价模型，并通过物元变换将不相容问题相容化的一种方法^[12-13]。

为解决单一主观赋权法和客观赋权法的局限性，笔者将 AHP 和 EWM 综合运用，通过组合赋权方式确定指标权重，并建立指标体系更为全面系统的物元可拓模型，计算出评价指标与虚拟维修技能水平的综合关联度，从而能更加科学合理的评价虚拟维修考核水平^[14-15]。

1 评价指标体系建立

笔者选取组织结构复杂、更具代表性的发动机为研究对象，在发动机虚拟维修系统的基础上，按

照“相对独立、紧贴实际、科学系统”的原则，参考军队装备维修保障职业技能鉴定中关于发动机维修考核的设置标准和影响因素，并经过咨询相关领域专家意见，建立了以理论知识、操作技能、逻辑思维、过程表现 4 项为一级准则，包含 13 项二级准则和 36 项评价指标的发动机虚拟维修考核评价指标体系，具体内容如图 1 所示。

1) 理论知识。

该准则主要考查考生对发动机组成结构、工作原理、零部件识别等理论的掌握水平，主要包括理论知识和形态认知 2 项主要内容。

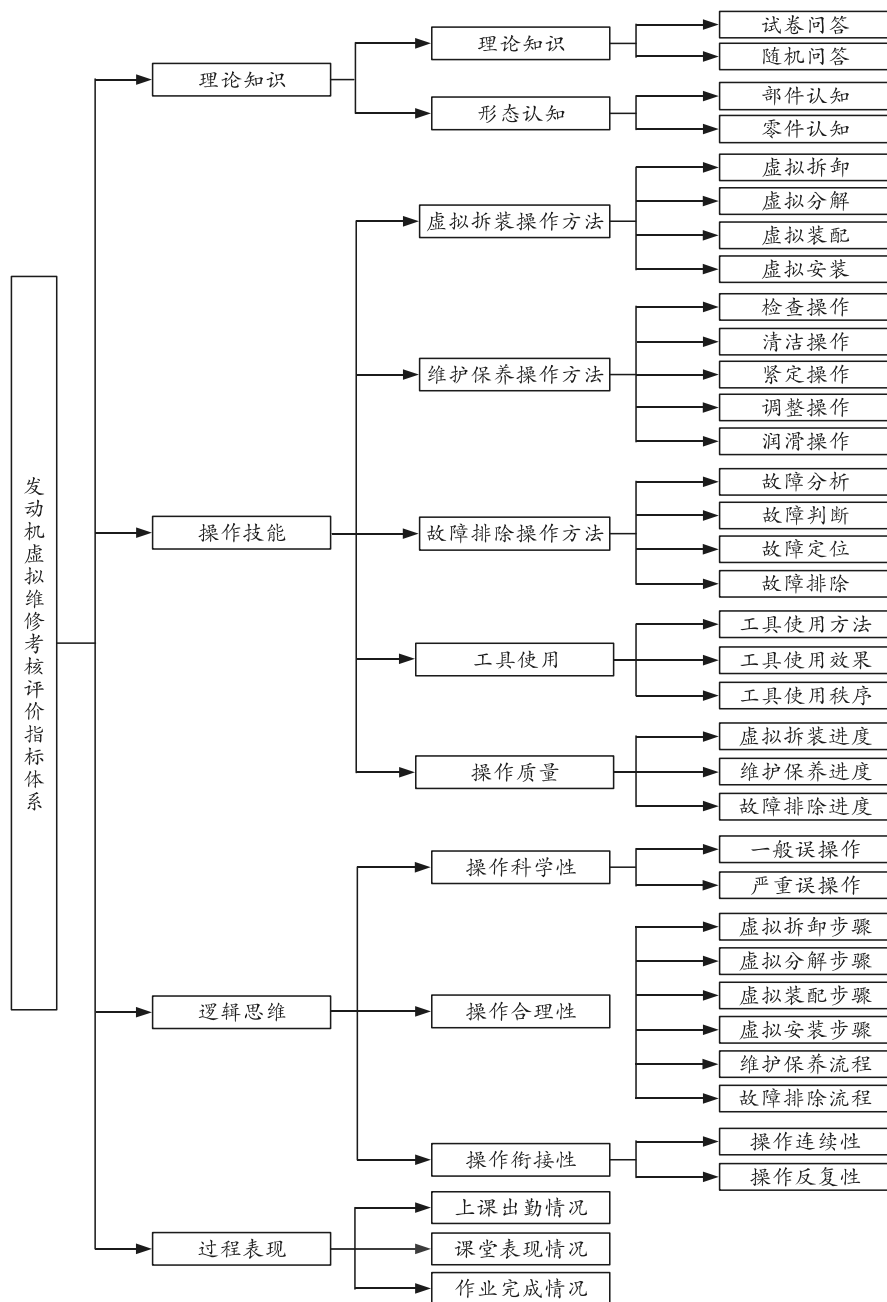


图 1 发动机虚拟维修考核评价指标体系

2) 操作技能。

该准则主要考查考生对发动机虚拟维修技能的动手实践能力，主要包括虚拟拆装操作方法、维护保养操作方法、故障排除操作方法、工具使用、操作质量等5项二级准则。其中，虚拟拆装、维护保养和故障排除的操作方法3项准则按照其虚拟维修的主要内容进行指标细化，主要对考生操作步骤的正确与否进行评价；工具使用考查的是考生运用工具的熟练程度；操作质量是对考生完成给定任务进度的考量。

3) 逻辑思维。

该准则以操作科学性、操作合理性、操作衔接性为二级准则，考查考生在虚拟维修操作过程中的

逻辑过程和思维方法，主要对其操作顺序的科学性、合理性以及思维反应能力进行评价。

4) 过程表现。

该准则主要考查考生在整个虚拟课程学习过程中的表现情况，主要包括上课出勤情况、课堂表现情况、作业完成情况。

2 评价指标方法计算

按照发动机虚拟维修的考核标准和要求，将发动机虚拟维修考核评价结果分为差、较差、一般、良好、优秀5个等级，分别用V、IV、III、II、I表示，每个等级根据标准划分不同分数线，考核评价指标分级情况如表1所示。

表1 发动机虚拟维修考核评价指标分级

目标层	一级 准则层	二级 准则层	指标层	评价指标体系					指标含义	
				差V	较差IV	一般III	良好II	优秀I		
虚拟 维修 考核 综合 评价 模型 U	知识 理论 A	理论知识 A1	试卷问答	A11	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数
			随机问答	A12	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数
		形态认知 A2	部件认知	A21	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数
			零件认知	A22	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数
	操作 技能 B	虚拟拆装 操作方法 B1	虚拟拆卸	B11	[0, 90]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			虚拟分解	B12	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			虚拟装配	B13	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			虚拟安装	B14	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
		维护保养 操作方法 B2	清洁操作	B21	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			紧定操作	B22	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			调整操作	B23	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			润滑操作	B24	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
		故障排除 操作方法 B3	防腐操作	B25	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			故障分析	B31	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			故障判断	B32	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			故障定位	B33	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
	工具使用 B4	工具使用 B4	故障排除	B34	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
			工具使用方法	B41	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	正确率
		操作质量 B5	工具使用效果	B42	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	达成率
			工具使用秩序	B43	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	归置率
			虚拟拆装进度	B51	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	进度比
	操作科学性 C1	操作科学性 C1	维护保养进度	B52	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	进度比
			故障排除进度	B53	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	进度比
	逻辑思维 C	操作合理性 C2	一般误操作	C11	[16, 100]	[11, 15]	[7, 10]	[4, 6]	[0, 3]	错误次数
			严重误操作	C12	[6, 10]	[3, 5]	[2, 3]	[1, 1]	[0, 0]	错误次数
		操作衔接性 C3	虚拟拆装步骤	C21	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
			虚拟分解步骤	C22	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
			虚拟装配步骤	C23	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
			虚拟安装步骤	C24	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
			维护保养流程	C25	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
			故障排除流程	C26	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	优化率
	过程 表现 D	操作连续性 C3	操作连续性	C31	[31, 100]	[21, 30]	[13, 20]	[6, 12]	[0, 5]	停顿次数
操作反复性			C32	[36, 100]	[26, 35]	[16, 25]	[8, 15]	[0, 7]	反复次数	
过程 表现 D	上课出勤 D1	上课出勤情况	D11	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数	
	作业完成 D2	课堂表现情况	D21	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数	
	课堂表现 D3	作业完成情况	D31	[0, 49]	[50, 59]	[60, 74]	[75, 84]	[85, 100]	分数	

2.1 理论知识准则层计算方法

该准则主要考查考生对发动机基础理论的掌握水平, 主要分为试卷问答、随机问答、部件认知和零件认知 4 项评价指标, 试题题型为选择、判断, 采取百分制, 按照 5 个等级进行划分。

2.2 操作技能准则层计算方法

该准则主要是操作考核, 考查考生对发动机虚拟维修技能的掌握水平。

1) 虚拟拆装操作方法。

虚拟拆装按照考核内容划分 4 项评价指标, 分别为虚拟拆卸、虚拟分解、虚拟装配和虚拟安装, 主要对拆装操作序列的正确率进行评价。

2) 维护保养操作方法。

维护保养按照考核内容划分 5 项评价指标, 分别为清洁操作、紧定操作、调整操作、润滑操作和防腐操作, 主要对保养操作流程的正确率进行评价。

3) 故障排除操作方法。

故障排除按照步骤划分 4 项评价指标, 分别为故障分析、故障判断、故障定位和故障排除, 主要对排除故障步骤的正确率进行评价。

4) 工具使用。

工具使用准则包括工具使用方法、工具使用效果、工具使用秩序。其中工具使用方法衡量的是考生运用工具的正确与否, 比如敲打某位置时应选用木锤, 结果选用了铁锤, 即使能达到维修效果, 但应判定为使用方法错误; 工具使用效果是指某项操作需要使用该工具的持续时间, 比如某螺栓需紧固 5 s, 如果只紧固 3 s, 则判别没有达到紧固效果; 工具使用秩序是衡量考生使用工具后是否将工具正确归置, 比如扳手使用后应放置在工具箱中, 若将其置于地面, 则判定为工具使用秩序不当一次。

5) 操作质量。

操作考核单元经过考生的一系列操作步骤后会产生产不同的效果, 系统根据其完成的进度情况对操作质量进行评价, 进度完成率越高, 说明操作质量越好。

2.3 逻辑思维准则层计算方法

该准则以操作科学性、操作合理性、操作衔接性为主要评价指标, 主要考查考生虚拟维修操作的思维过程。

1) 操作科学性。

操作科学性二级准则分为一般误操作和严重误

操作 2 项评价指标。虚拟维修考核系统根据发动机维修操作规程设置考核要求, 规定考生在操作过程中, 允许出现一般误操作。所谓一般误操作, 是指该操作违反了技术规程, 但对发动机的损伤程度比较轻微, 没有产生实质性破坏; 因此, 允许出现此类操作, 考生可以继续操作, 但根据一般误操作次数要扣掉相应分数。所谓严重误操作, 是指一旦发生此类操作会严重损伤发动机, 造成实质性损害; 因此, 在操作过程中严禁出现此类情况, 一旦出现严重误操作, 系统会立即停止该项内容的考核。根据操作考核科目设置, 主要涉及 10 类考核项目: 虚拟拆装 4 类(虚拟拆卸、虚拟分解、虚拟装配、虚拟安装)、维护保养 5 类(清洁、紧定、调整、润滑、防腐)、故障排除 1 类。

2) 操作合理性。

操作合理性准则主要是对虚拟拆装序列、维护保养流程、故障排除步骤等操作顺序的合理性进行评价。每名考生操作过程中, 系统会全程记录考生的每一步操作行为, 通过将考生的操作顺序与维修知识图谱中的顺序集进行匹配, 并对其操作顺序的优化程度进行评价打分。

3) 操作衔接性。

操作衔接性准则主要分为操作连续性和操作反复性, 考查的是考生逻辑思考能力和思维反应能力。考生在两步操作之间的时间间隔越大, 说明考生的思维过程越慢, 操作的衔接性越低; 反复性是指考生因技能掌握不熟练反复进行某项操作, 系统记录动作的重复性次数并评价打分。

2.4 过程表现准则层计算方法

过程表现准则包括上课出勤情况、课堂表现情况和作业完成情况 3 项, 成绩均采取百分制, 授课老师根据考生课程学习全过程的综合情况进行打分, 类似于线下教学中平时成绩的做法。

3 评价指标权重确定

发动机虚拟维修考核评价影响因素较多, 各评价指标的影响程度层次不齐。为更加准确地判断和评价发动机虚拟维修考核效果, 需要合理确定各评价指标的权重。笔者采用 AHP 和 EWM 组合赋权, 使权重赋值更加合理。通过建立评价指标体系和物元可拓模型, 根据关联度的计算结果确定发动机虚拟维修考核的等级水平, 其评价模型建立流程如图 2 所示。

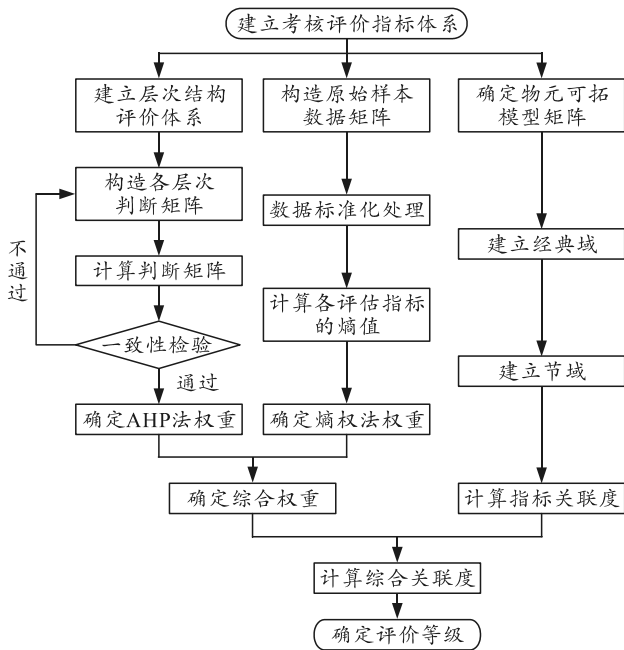


图 2 AHP 熵权-物元分析法考核评价模型建立流程

3.1 层次分析法

层次分析法是确定指标权重最常用的方法，主要是通过两两比较的方法确定各评价指标的相对重要性，按照表 2 所示的比较规则，构造各指标层级判断矩阵。

表 2 评价指标相对重要性比较规则

比例标度	含义
1	2 因素具有相同重要性
3	前因素比后因素稍重要
5	前因素比后因素明显重要
7	前因素比后因素非常重要
9	前因素比后因素极其重要
2, 4, 6, 8	表示处于相邻标度的中间值

假设某评价模型有 n 个指标因素，分别为 A_1, A_2, \dots, A_n ，它们的重要性分别为 w_1, w_2, \dots, w_n 。若将它们两两比较，其比值可构成 $n \times n$ 矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据评价指标的具体影响因素，一般将评价指标体系分为目标层、准则层和指标层，复杂问题可分为目标层、一级准则层、二级准则层、指标层或者其他层次更多的结构。

由于评价指标之间采取两两比较法，判断矩阵缺少整体的一致性；因此，为检验比较结果，需要通过下式计算一致性指标 CI 和相应的随机一致性指标 RI 。

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

$$CR = CI / RI. \quad (3)$$

式中： λ_{\max} 为最大特征值； CI 为一致性指标； RI 为随机一致性指标； CR 为检验后的矩阵一致性指标。

n 阶矩阵对应的平均随机一致性指标 RI 取值参照表 3。由于 1、2 阶判断矩阵总是具有满意的一致性，因此不再进行检验。当矩阵阶数 $n > 2$ 且 $CR < 0.1$ 时，说明判断矩阵的整体一致性较好，否则需要进行适当的修正，直至满足一致性检验条件。

表 3 n 阶矩阵平均随机一致性指标 RI 取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

3.2 熵权法

熵权法是根据所提供的基础数据来确定评价指标权重的研究方法。发动机虚拟维修考核评价指标的样本数据差距越大，反映其信息量就越大，熵越小，其指标的权重就越大；反之权重越小^[16]。熵权法确定评价指标权重的具体步骤如下：

1) 建立评价矩阵。假设有 n 个评价指标， s 个评价样本，建立 $X = (x_{ij})_{n \times s}$ 的评价矩阵 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, s$)。

2) 数据标准化处理。为统一各评价指标的计量单位，需对基础数据进行标准化处理，正向指标做正向化处理，负向(逆向)指标做逆向化处理。如理论知识、部件识别和一般误操作这 3 项评价指标，很明显理论知识和部件识别这 2 项指标数据值越大越好，所以属于正向指标，需要进行正向化处理，但一般误操作指标数据值越小越好，所以属于负向指标，需要进行逆向化处理。这样处理后，数据方向就完全一致且解决掉量纲问题(正向和逆向这 2 种处理可同时解决方向和量纲问题)。

正向指标：

$$y_{ij} = (x_{ij} - \min x_{is}) / (\max x_{is} - \min x_{is}); \quad (4)$$

负向指标：

$$y_{ij} = (\max x_{is} - x_{ij}) / (\max x_{is} - \min x_{is}). \quad (5)$$

式中： x_{ij} 为第 i 个指标、第 j 个样本的原始数据值； y_{ij} 为第 i 个指标、第 j 个样本标准化处理后的数据值。

3) 根据信息熵的定义，计算各评价指标的熵值：

$$e_i = -\frac{1}{\ln s} \sum_{j=1}^s f_{ij} \ln f_{ij}; \quad (6)$$

$$f_{ij} = y_{ij} / \sum_{j=1}^s y_{ij} \quad (7)$$

式中： e_i 为第 i 个指标的熵值；当 $f_{ij}=0$ 时，定义 $\lim_{f_{ij} \rightarrow 0} \ln f_{ij} = 0$ 。

4) 通过熵值计算各评价指标的权重：

$$h_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (8)$$

式中 h_i 为第 i 个评价指标的权重， i 的取值范围为 $1, 2, \dots, n$ 。

3.3 组合权重

将层次分析法计算得到的指标权重 w_i 和熵权法计算得到的指标权重 h_i ，通过式(9)进行耦合，得到最终的组合权重 g_i ，即

$$g_i = w_i h_i / \sum_{i=1}^m w_i h_i \quad (9)$$

3.4 物元可拓评价模型

根据物元可拓法构建发动机虚拟维修考核评价模型，首先要确定经典域、节域和评价物元，然后计算评价物元关于经典域量值的距离，得到虚拟维修技能的关联度，从而确定评价等级，下面是物元可拓评价模型的建立步骤^[17]。

1) 确定经典域 R_N 的量值：

$$R_N = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \dots & N_t \\ C_1 & (a_{11}, b_{11}) & (a_{12}, b_{12}) & \dots & (a_{1t}, b_{1t}) \\ C_2 & (a_{21}, b_{21}) & (a_{22}, b_{22}) & \dots & (a_{2t}, b_{2t}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & (a_{n1}, b_{n1}) & (a_{n2}, b_{n2}) & \dots & (a_{nt}, b_{nt}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： $N_j(j=1, 2, \dots, t)$ 为虚拟维修技能水平划分的第 j 个等级； $C_j(i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个评价指标； (a_{ij}, b_{ij}) 为第 i 个指标关于第 j 个等级所取的量值范围。

2) 确定节域：

表 4 发动机虚拟维修考核评价指标体系目标层判断矩阵

目标层	U	A	B	C	D	最大特征值	一致性指标	修正一致性指标	权重	一致性
理论知识	A	1	1/5	1/3	6	5.590 08	0.071 192 3	0.063 361 1	0.136 7	是
操作技能	B	5	1	2	8				0.513 9	是
逻辑思维	C	3	1/2	1	7				0.309 3	是
过程表现	D	1/6	1/8	1/7	1				0.040 1	是

通过各层级判断矩阵的计算，各判断矩阵的一致性检验均符合一致性要求，发动机虚拟维修考核评价模型各层级指标权重 $w_i=(0.057 4, 0.024 6, 0.016 4, 0.038 3, 0.097 3, 0.065 1, 0.035 9, 0.013 1,$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C & V \\ & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： N_p 为待评价物元等级； $V_i=(a_i, b_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 为待评物元第 i 项指标 C_i 的取值范围。

3) 计算待评物元 R_L 第 i 项指标 C_i 的关联度，其关联度函数为：

$$K_j(V_i) = \begin{cases} \rho(V_i, V_{ji}) / (\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})) & (V_i \notin V_{ji}) \\ -\rho(V_i, V_{ji}) / |V_{ji}| & (V_i \in V_{ji}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho(V_i, V_{ji}) = |V_i - (a_{ij} + b_{ij}) / 2| - (b_{ij} - a_{ij}) / 2 \quad (13)$$

式中： V_i 为 C_i 的取值； $\rho(V_i, V_{ji})$ 为 V_i 关于经典域 R_N 量值范围的距离。

4) 计算综合关联度：

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n g_i K_j(V_i) \quad (14)$$

5) 确定评价等级：

$$K_j = \max \{ K_j(N) \} \quad (15)$$

若存在 K_j ，则待评对象的等级为 j 。

4 实例应用

4.1 计算指标权重

1) 层次分析法计算权重。

通过查阅相关资料，咨询专家意见，最终构建发动机虚拟维修考核评价指标体系目标层、4 项一级准则层、13 项二级准则层的判断矩阵。通过计算，求得各判断矩阵的最大特征值、一致性指标 CI 、修正一致性指标 CR 以及对应的指标权重。对于只有 2 项准则或者只有 2 项指标的层级通过咨询专家直接进行权重赋值，不再进行判断矩阵的运算，发动机虚拟维修考核评价指标体系目标层判断矩阵如表 4 所示。

$0.038 5, 0.003 8, 0.007 8, 0.026 9, 0.015 3, 0.015 0, 0.025 2, 0.043 7, 0.073 5, 0.003 9, 0.014 4, 0.001 3, 0.017 5, 0.004 6, 0.011 0, 0.045 3, 0.024 4, 0.076 3, 0.050 4, 0.036 7, 0.017 5, 0.011 5, 0.016 0, 0.023 4,$

0.007 8, 0.003 7, 0.008 7, 0.027 7)。

2) 熵权法计算权重。

根据发动机虚拟维修考核评价的基础数据，选取甲、乙、丙、丁、戊 5 名考生的成绩构造评价矩阵 $X=(x_{ij})_{36 \times 5}$ ，即

$$X = \begin{bmatrix} 72 & 90 & 70 & 65 & 58 \\ 80 & 85 & 82 & 63 & 60 \\ 75 & 86 & 76 & 78 & 62 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 86 & 89 & 71 & 75 & 56 \end{bmatrix}。$$

根据式(4)和(5)进行指标的正向化和逆向化处理，根据式(7)和(8)计算各评价指标的熵值和熵权，最终得到 36 个评价指标的权重 $h_i=(0.029 8, 0.030 3, 0.020 0, 0.027 0, 0.03 5, 0.021 6, 0.031 9, 0.044 7, 0.024 5, 0.027 7, 0.023 2, 0.022 4, 0.020 3, 0.018 9, 0.033 8, 0.032 2, 0.027 6, 0.040 5, 0.030 3, 0.028 1, 0.038 4, 0.039 5, 0.039 7, 0.025 0, 0.040 2, 0.037 5, 0.022 6, 0.024 2, 0.019 5, 0.025 3, 0.023 0, 0.001 6, 0.023 2, 0.025 6, 0.022 1, 0.021 4)$ 。

3) 计算组合权重。

根据式(9)计算各评价指标的组合权重 g_i 。发动机虚拟维修考核评价模型以及准则层指标权重和二级准则层指标权重均采用 AHP 法进行确定，指标层权重采用组合赋权法确定，得到 $g_i=(0.060 7, 0.026 5, 0.011 7, 0.036 7, 0.121 9, 0.050 0, 0.040 6, 0.020 9, 0.033 5, 0.003 7, 0.006 4, 0.021 4, 0.011 0, 0.010 0, 0.030 0, 0.049 9, 0.071 8, 0.005 6, 0.015 5, 0.001 3, 0.023 9, 0.006 5, 0.015 5, 0.041 7, 0.034 9, 0.101 5, 0.040 5, 0.031 5, 0.012 1, 0.010 4, 0.013 1, 0.001 3, 0.006 4, 0.003 3, 0.006 9, 0.021 0)$ 。

4.2 建立考核评价物元可拓模型

1) 构造经典域。

虚拟维修技能水平 N 评价指标 C 和特征值 V 共同组成了发动机虚拟维修考核评价物元可拓模型经典域 R_N ，按照表 1 内容，经典域为：

$$R_N = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ C_1 & [0,49] & [50,59] & [60,74] & [75,84] & [85,100] \\ C_2 & [0,49] & [50,59] & [60,74] & [75,84] & [85,100] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{36} & [0,49] & [50,59] & [60,74] & [75,84] & [85,100] \end{bmatrix}。$$

2) 构造节域。

根据表 1 构造节域 R_p ，即

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C & V \\ C_1 & [0,100] \\ C_2 & [0,100] \\ \vdots & \vdots \\ C_n & [0,100] \end{bmatrix}。$$

3) 按照选取的甲、乙、丙、丁、戊 5 名考生的成绩构造建待评物元 R_0 ，即

$$R_0 = \begin{bmatrix} N & C_1 & 72 & 90 & 70 & 65 & 58 \\ C_2 & 80 & 85 & 82 & 63 & 60 \\ C_3 & 75 & 86 & 76 & 78 & 62 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{36} & 86 & 89 & 71 & 75 & 56 \end{bmatrix}。$$

4) 计算综合关联度。

根据式(12)、(13)和(14)可计算出各考生的综合关联度，5 名考生的发动机虚拟维修考核评价综合关联度计算结果如表 5 所示。

表 5 5 名考生的发动机虚拟维修考核评价综合关联度计算结果

考生	差 V	发动机虚拟维修考核评价指标体系				最大 关联度	评价等级
		较差IV	一般III	良好II	优秀I		
甲	-0.118 1	-0.102 0	-0.052 6	-0.008 0	-0.010 3	-0.008 0	良好II
乙	-0.139 6	-0.129 0	-0.097 9	-0.048 7	0.024 7	0.024 7	优秀I
丙	-0.075 4	-0.048 6	-0.000 9	-0.026 9	-0.049 7	-0.000 9	中等III
丁	-0.083 2	-0.060 8	0.012 6	-0.014 9	-0.044 8	0.012 6	中等III
戊	-0.053 2	-0.007 0	-0.020 0	-0.044 5	-0.055 3	-0.007 0	较差IV

4.3 考核结果分析

通过上表的综合关联度计算结果，可以得出 5 名考生的评价等级。对于甲考生， $K I(N)=-0.010 3$ ， $K II(N)=-0.008 0$ ， $K III(N)=-0.052 6$ ， $K IV(N)=-0.102 0$ ， $K V(N)=-0.118 1$ ， $K_j=\max\{K_j(N)\}=-0.008 0$ ；因此，甲的发动虚拟维修技能等级为 II 级，技能水平属于良好。以此类推，乙考生的最大关联度 $K_j=\max\{K_j(N)\}=0.024 7$ ；因此， $j=I$ ，等级为 I 级，

技能水平属于优秀。丙考生的最大关联度 $K_j=\max\{K_j(N)\}=-0.000 9$ ；因此， $j=III$ ，等级为 III 级，技能水平属于一般。丁考生的最大关联度 $K_j=\max\{K_j(N)\}=0.012 6$ ；因此， $j=III$ ，等级为 III 级，技能水平属于一般；戊考生的最大关联度 $K_j=\max\{K_j(N)\}=-0.007 0$ ；因此， $j=IV$ ，等级为 IV 级，技能水平属于较差。

5 结论

笔者运用组合赋权方式,解决了单一主观赋权法和客观赋权法的局限性问题,从而使指标权重的确定更加科学合理,提高了考核评价的准确性。将物元可拓理论应用到虚拟维修考核评价体系中,合理地解决了评价体系各指标之间的不相容性问题,完成了评价指标定性向定量的转化。笔者建立的基于 AHP 熵权-物元分析法的虚拟维修考核评价模型,以 5 名考生的基础数据为例,对其维修技能等级进行了考核评价,不仅评价结果准确,而且还可以通过各层级指标的关联度数据对考生的具体考核影响因素进行具体分析,做到有针对性地指导学生。

后续研究中,可以充分运用在线课程的大数据优势,更新考核基础数据,优化指标权重赋值,完善考核评价模型,使考核评价趋于科学合理。笔者将物元分析法引入虚拟维修课程的考核评价,对其他虚拟在线课程的考核研究也具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] LIU F, GUANG Y, LU Y. The research of systemArchitecture of dynamics modeling system based on virtual assembly for integrated Transmission[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 456-464.
- [2] Johnson Controls Technology Company. "Virtual Maintenance Manager" in Patent Application Approval Process: USPTO 20190355240[J]. Computer Technology Journal, 2019.
- [3] 魏士松,周正东,章栩苓,等. 基于桌面虚拟现实技术的航天器虚拟维修训练系统[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1358-1363.
- [4] 丁平. 基于 AHP 的装备保障虚拟训练效果评估方法[J]. 兵工自动化, 2008, 40(3): 59-62.
- [5] 朱自伟. 基于 EON 的柴油机虚拟维修训练系统的研究与实现[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [6] 张琦,程培源,陆屹. 某型电源装备虚拟训练系统的综合评判模型[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(12): 179-183, 188.
- [7] 张爽,王洁,徐啟云,等. 基于层次分析和熵权法的虚拟维修评价方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(6): 149-153.
- [8] 徐一麟. 基于知识的虚拟维修训练效果评价方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [9] 谢晖,罗艳霞,沈晓敏,等. 虚拟仿真课程的“行为-能力”双模态智能评价——以“现代工科微生物学仿真实验”课程为例[J]. 现代教育技术, 2020, 30(10): 105-111.
- [10] 陈兴博. 基于 AHP 熵权-物元模型的出租汽车市场运行状况评价[J]. 江苏科技信息, 2021(7): 39-43.
- [11] 陈小刚,朱万红,黄湘皖,等. 基于反熵权物元法的防护工程损毁后内部空间环境质量评价[J]. 防护工程, 2021, 43(3): 55-62.
- [12] 柯愈贤,王成,方立发,等. 基于组合权重和物元分析的矿山安全生产状况研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(6): 910-919.
- [13] 崔利杰,曹志远,陈浩然,等. 基于物元分析法的航空事故应急预案评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(4): 115-119.
- [14] 曹东风,王艳. 基于组合权重的制造系统能效贝叶斯评价方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 4313-4322.
- [15] 程元庚,李福林,范明元,等. 基于组合赋权和改进物元可拓模型的虚拟维修技能水平评估[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 230-238.
- [16] 左林霄,高鹏,冯栋,等. 基于 AHP-熵权法耦合方法的地质构造复杂程度定量评价[J/OL]. 煤炭科学技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20210508.0945.002.html>.
- [17] 周瑜,邹自力,蔡联斌. 基于 AHP-熵权物元评判模型的高标准农田项目实施综合效益评价[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(22): 151-155.