

# 无人机飞行训练资源配置效率的 AHP-Arena 综合评价方法\*

张尧<sup>1,3</sup>, 王建楠<sup>2</sup>

(1. 武警工程大学 研究生大队, 陕西 西安 710086; 2. 武警部队研究院 装备技术研究所, 北京 100012;  
3. 武警特种警察学院 情报侦察系, 北京 102211)

**摘要:**为降低传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)赋权过程主观片面性影响,提出了一种综合 AHP 与 Arena 仿真建模技术的无人机训练资源配置效率评价方法。基于飞行训练流程分析,确定了训练资源配置效率影响因素和效率评价指标,建立了层次型综合评价体系,概括了 AHP-Arena 综合评价步骤。利用 Arena 建模软件构建训练流程动态仿真系统并验证有效性,采用单变量数值仿真法、均方差决策法完成了影响因素客观赋权,通过线性加权综合法得出综合评价系数,实现资源配置效率评价与方案优选。实例应用说明了该方法的有效性,同时,该方法可推广至其他类似的训练过程中,亦可为其他多因素、多指标评价决策过程提供借鉴。

**关键词:**无人机;飞行训练;训练资源配置效率;层次分析法

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2022)04-204-09

## AHP-Arena comprehensive evaluation method for the efficiency of allocation of UAV flight training resources

ZHANG Yao<sup>1,3</sup>, WANG Jiannan<sup>2</sup>

(1. Postgraduate Brigade, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China;

2. Institute of Equipment Technology, Academy of PAP, Beijing 100012, China;

3. Department of Intelligence and Reconnaissance, Special Police College of PAP, Beijing 102211, China)

**Abstract:** In order to reduce the subjective one-sided influence of empowerment process of the traditional hierarchical analysis method, a comprehensive AHP(analytic hierarchy process) and Arena simulation modeling technology was proposed to evaluate the efficiency of the allocation of UAV(unmanned aerial vehicle) training resources. Based on flight training process analysis, the factors influencing the efficiency of training resource allocation and efficiency evaluation index were determined, a hierarchical comprehensive evaluation system was established, and the comprehensive evaluation steps of AHP-Arena were summarized. Arena modeling software was used to realize the dynamic simulation system of the training process and verify the validity, the single-variable numerical simulation method and the mean variance decision-making method were used to complete the objective empowerment of the influencing factors, and the comprehensive evaluation coefficient was obtained by linear weighting comprehensive method, so as to implement resource allocation efficiency evaluation and selection of the optimal program. The practical application shows the effectiveness of the method. Meanwhile, this method can be extended to other similar training processes, and can also provide references for other multi-factor multi-indicator evaluation decision-making processes.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; flight training; training resource allocation efficiency; analytic hierarchy process

无人机作为新型作战力量的典型代表,其战场效能需要大量专业人才支撑。无人机飞行技能是无人机各专业岗位必须掌握的一项通用型技能,是战场战术协同的前提。组训者及教练员人员是无人机教学训练的核心<sup>[1]</sup>,而当前日常教学训练往往凭借教员专业经验进行组训,资源配置随意性较大,缺少客观量化依据,对施训者自身素质水平依赖性较强,训练效果难以保证。当前,无人

机操控人员短缺,训练资源匮乏,如何在有限条件下提升无人机飞行训练资源配置效率成为亟待解决的一个重要问题。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是美国著名的运筹学家萨迪教授在 1980 年提出<sup>[2]</sup>,并确立一种层次化、定性和定量结合的多目标决策评价方法<sup>[3]</sup>。目前在复杂系统效能评估和方案优选中应用较为广泛的依然是层次分析

\* 收稿日期:2021-05-04

基金项目:国家部委基金资助项目(WJ20191A010005)

作者简介:张尧(1985—),男,福建福州人,副教授,硕士研究生, E-mail:yorkiller@163.com

方法及其衍生方法<sup>[4]</sup>。大量研究表明,将 AHP 方法与其他决策方法或数学模型进行结合得到了广泛应用<sup>[5]</sup>;刘建华等<sup>[6]</sup>运用层次分析法-逼近理想解排序法(analytic hierarchy process-technique for order preference by similarity to an ideal solution, AHP-TOPSIS)模型解决选择工具困难的问题,通过 MATLAB 软件计算最终贴适度  $T$  进行优劣排序;周云<sup>[7]</sup>将模糊 AHP 层次分析法与服务等级协定(service level agreement, SLA)业务管理数据模型结合用于评估军事通信网络系统效能,使指标权重能够更全面地反映用户体验和保障效能;王彪等<sup>[8]</sup>利用指数标度法构建正互反矩阵的方法计算无人机作战能力指标权重,降低了标度的主观性影响;Badri<sup>[9]</sup>将 AHP 方法与目标规划方法相结合,在目标模型中引入优先权重,辅助公司在资源限制条件下选择最佳服务质量控制系统;Korpela 等<sup>[10]</sup>和 Jung 等<sup>[11]</sup>将 AHP 与数学优化模型结合,在预算约束条件下寻求最优质量目标。上述研究虽然进行了一定程度的改良,但人为赋权主观性影响依然较大。同时,也有部分学者将 Arena 软件应用于 AHP 方法所得结论的模拟验证上;Raja 等<sup>[12]</sup>基于 AHP 矩阵得出的高密度聚乙烯回收物流路径,利用 Arena 软件模拟验证并寻找最优路径;鞠儒生等<sup>[13]</sup>通过熵值模型

分析了 AHP 模型的合理性,并利用 Arena 软件验证了结果。上述研究仅仅利用 Arena 软件作为模拟验证结论的手段,与 AHP 方法本身并未融合。

本文从无人机飞行训练本质特征出发,提出了一种基于 AHP 方法与 Arena 仿真建模技术的飞行训练资源配置效率综合评价方法,用模拟仿真分析取代人为主观评价,改良影响因素权重确定过程,大幅降低了传统 AHP 方法中人为评价主观片面性影响,为无人机飞行训练资源配置效率评价、方案优选及高效组训提供客观的量化决策依据。

### 1 训练资源配置效率评价体系

无人机飞行训练资源配置,应以飞行训练成效最好为导向,以资源周转效率最大为目标。首先应从飞行训练流程主要环节入手,确定影响训练资源配置效率的主要因素,引入评价指标,建立飞行训练资源配置效率层次型综合评价体系。

#### 1.1 无人机飞行训练流程

无人机飞行训练是学员熟悉无人机真实环境操控特性,掌握飞行控制技能和培养良好飞行习惯的重要训练内容。通过训练过程分析,无人机飞行训练主要围绕检查调试、展开训练、电池保障、现场维修 4 个基本环节进行,流程如图 1 所示。

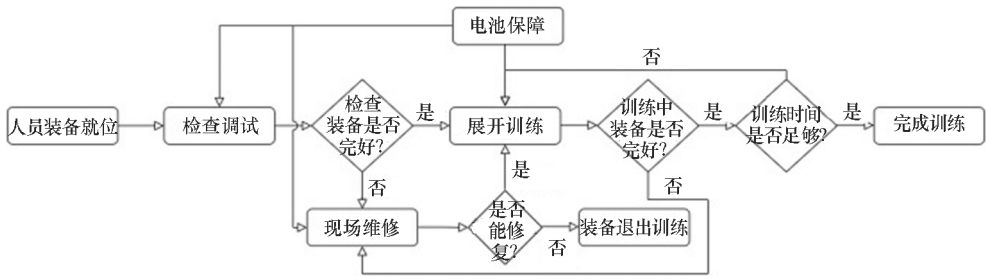


图 1 无人机飞行训练流程  
Fig. 1 UAV flight training process

#### 1.2 训练资源配置效率影响因素

无人机飞行训练各环节均需要投入人力、设备和时间等资源,训练资源配置直接影响训练效果。训练资源配置效率受到多方面因素的影响,且影响因素呈现出非线性、动态性、模糊性的特点<sup>[14]</sup>,主要可概括为人员因素和设备保障因素两个方面:人员因素包括师资力量、操控水平、训练态度等定性因素;设备保障包括训练机数量、电池及充电设备配备数量等定量因素。通过分析各环节工作内容,分别归纳出各环节的主要影响因素,如图 2 所示。

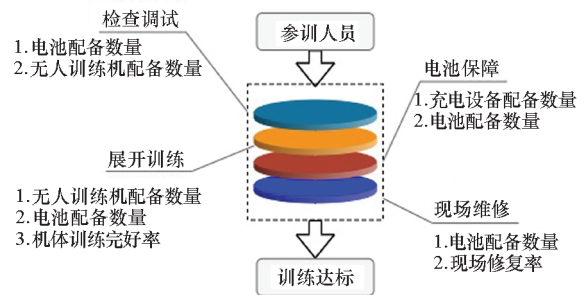


图 2 无人机飞行训练资源配置效率影响因素  
Fig. 2 Influencing factors of allocation efficiency of UAV flight training resource

经过归纳整理,训练资源配置效率影响因素

主要有无人训练机配置数量、电池配置数量、充电

设备配置数量、机体训练完好率、现场修复率。其中,人员因素可通过机体完好率和现场修复率间接体现。

### 1.3 训练资源配置效率评价指标

无人机飞行训练资源配置效率从达成率和经济性两个维度进行评价。达成率主要体现在每次训练达到有效飞行训练时间的人数,即训练达标能力指标  $P_1$ ;经济性主要体现在训练过程中训练资源循环周转效率,包括训练资源周转指标  $P_2$  及资源最大等待时间  $P_3$ 。

#### 1.3.1 训练达标能力指标 $P_1$

训练达标能力指标  $P_1$ ,指一次完整训练中达到有效飞行训练时间(1 h/(人·d))的人数与参训总人数的比例。 $P_1$  值越大,该训练资源配置方案训练达标人数越多,可表示为:

$$P_1 = \frac{C_f}{C} \times 100\% \quad (1)$$

其中: $P_1$ 为训练达标能力, $0 \leq P_1 \leq 1$ ;  $C_f$ 表示达到有效飞行训练时间的参训人数; $C$ 表示参训总人数。

#### 1.3.2 训练资源周转指标 $P_2$

训练资源周转指标  $P_2$ ,指训练过程中参训者等待训练资源的平均时间。 $P_2$  值越小,训练资源循环周转效率越高,可表示为:

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^c T(\text{Wait})_i}{C} \quad (2)$$

其中: $P_2$ 表示训练资源周转效率, $P_2 \geq 0$ ;  $T(\text{Wait})_i$ 表示第  $i$  个参训者在训练过程中等待资源的全部时间,单位 min。

#### 1.3.3 资源最大等待时间 $P_3$

资源最大等待时间  $P_3$ ,指参训者等待某一训练资源释放的最大等待时间( $P_3 \geq 0$ ),用以描述训练过程中周转效率最差的情况,单位 min。 $P_3$  值越大,表示该训练资源配置方案短板越明显; $P_3$  值越小,表示该训练方案中资源周转效率普遍较高。

### 1.4 层次型综合评价体系

AHP 层次分析法是一种简捷、实用的定性与定量相结合的决策方法<sup>[15]</sup>。依据 AHP 层次分析理论,可以将无人机飞行训练过程涉及的各类非序列因素,划分为条理分明、相互联系的有序层次,形成有利于分析和比较的层次结构<sup>[16]</sup>,如图 3 所示。无人机飞行训练资源配置效率评价体系以飞行训练资源配置效率  $Z$  为目标层,向下分解为指标层,设指标集  $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ ;因素层,设影响因素集  $U = \{\text{无人训练机配置数量 } U_1, \text{电池配置数量 } U_2, \text{充电设备配置数量 } U_3, \text{机体训练完好率 } U_4, \text{现场修复率 } U_5\}$ ;方案层,设方案集  $S = \{\text{资源配置方案 } S_1, \text{资源配置方案 } S_2, \dots, \text{资源配置方案 } S_n\}$ 。

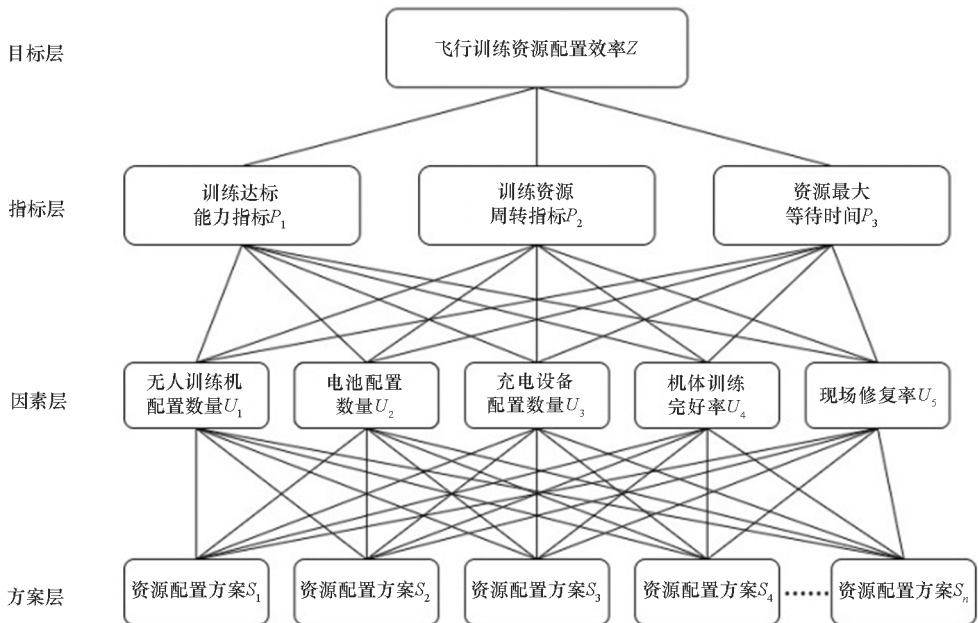


图 3 无人机飞行训练资源配置效率评价体系

Fig. 3 Evaluation system for allocation efficiency of UAV flight training resources

## 2 训练资源配置效率评价方法

### 2.1 训练资源配置效率综合评价步骤

结合以上论述,将基于 AHP-Arena 的无人机飞行训练资源配置效率综合评价方法步骤进行概括,如图 4 所示。

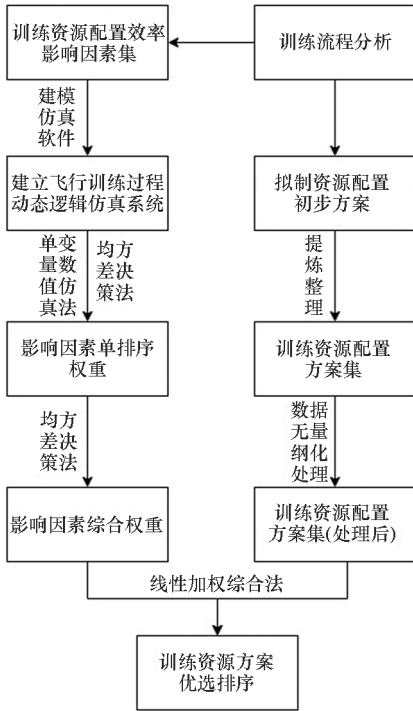


图 4 AHP-Arena 综合评价步骤

Fig. 4 Steps for AHP-Arena comprehensive evaluation

在运用 AHP 过程中,指标权重设置(即重要程度的量化)是非常重要的,它直接影响了分析结果<sup>[17]</sup>。由图 4 可知,该方法通过对训练流程的分析,在确定无人机飞行训练资源配置效率影响因素基础上,利用 Arena 建模仿真软件将训练流程转换为训练过程动态逻辑仿真系统<sup>[18]</sup>,随后基于仿真系统运用单变量数值仿真法<sup>[19]</sup>获得各影响因素对应的指标值,再通过均方差决策法<sup>[20]</sup>赋予影响因素单排序权重及综合权重,最后将经过提炼整理的资源配置方案进行无量纲化处理,并分别与各影响因素综合权重通过线性加权<sup>[21]</sup>得到资源配置效率综合评价系数,从而获得方案优选排序。

### 2.2 Arena 仿真系统构建

#### 2.2.1 Arena 仿真技术简介

仿真是对有限资源分配、占用、释放方式进行研究的试验工具。本文选用的 Rockwell Arena 软件,是美国罗克韦尔自动化(Rockwell Automation)有限公司于 1993 年开始研制开发的

新一代通用仿真软件,可以实现离散系统、连续系统和混合系统的仿真,具有功能强大、使用方便、界面直观、输入输出与过程分析功能强大等优点<sup>[22]</sup>。Arena 采用可视化建模和运行环境,在数据输入、输出及模型调试等方面比 Flexsim、eM-Plant 等更稳定<sup>[23]</sup>。利用 Arena 仿真技术,构建无人机飞行训练运行过程和各环节资源约束规则的逻辑和数量关系模型,用以客观反映训练组织过程和训练成果,便于分析各环节影响因素变化对训练资源配置效率的影响,达到提升训练资源配置成熟度,增强训练组织的可行性、合理性的目的。

#### 2.2.2 仿真系统设计与实现

无人机飞行训练过程属于典型的离散事件系统<sup>[24]</sup>。仿真系统设计以训练资源为元素,以参训人员为实体,以训练资源配置效率评价指标为输出,规划输入、运行和输出 3 个组成部分。其中,运行过程设计 4 个子系统,分别对应检查调试、展开训练、电池保障、现场维修 4 个环节,如图 5 所示。

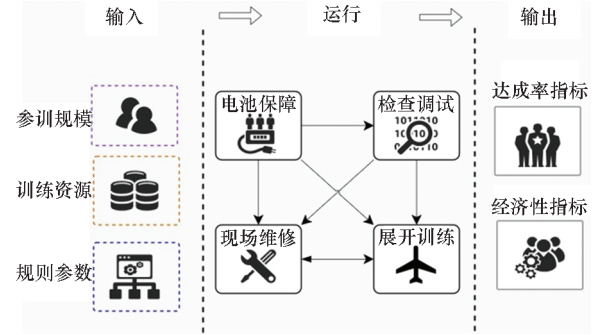


图 5 无人机飞行训练仿真系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of UAV flight training simulation system

仿真系统源于真实的训练过程,更能准确直观地体现各环节资源运行细节,以此来替代人为主观经验所得出的结论更具针对性和客观性,为无人机飞行训练过程提供了一种低成本、高效率的动态模拟仿真手段。

### 2.3 影响因素单变量数值仿真

单变量数值仿真指在仿真过程中,仅改变单一影响因素数值,其他因素均不发生变化,以分析该影响因素变动对评价指标的影响<sup>[25]</sup>。因此,基于构建的无人机飞行训练仿真系统,对影响因素集  $U$  中各因素分别进行  $m$  组单变量数值仿真,对应获得指标集  $P$  中对应指标值  $A_{ij}/B_{ij}/C_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 5$ ),如表 1 所示。

表 1 单变量数值仿真  $P_1/P_2/P_3$  指标值

Tab. 1  $P_1/P_2/P_3$  indicator value of single-variable numerical simulation

仿真组数	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1	$A_{11}/B_{11}/C_{11}$	$A_{12}/B_{12}/C_{12}$	$A_{13}/B_{13}/C_{13}$	$A_{14}/B_{14}/C_{14}$	$A_{15}/B_{15}/C_{15}$
2	$A_{21}/B_{21}/C_{21}$	$A_{22}/B_{22}/C_{22}$	$A_{23}/B_{23}/C_{23}$	$A_{24}/B_{24}/C_{24}$	$A_{25}/B_{25}/C_{25}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$m$	$A_{m1}/B_{m1}/C_{m1}$	$A_{m2}/B_{m2}/C_{m2}$	$A_{m3}/B_{m3}/C_{m3}$	$A_{m4}/B_{m4}/C_{m4}$	$A_{m5}/B_{m5}/C_{m5}$

### 2.4 基于均方差决策法的影响因素权重确定

均方差可以直观地描述一组随机变量的离散程度,均方差决策法就是基于均方差求解多指标决策权重系数的方法,该方法能够进一步降低人为决策偏差和主观赋权法的随机性<sup>[26]</sup>。

#### 2.4.1 确定影响因素单排序权重系数步骤公式

计算  $A_{ij}/B_{ij}/C_{ij}$  均值,即

$$E(A_j/B_j/C_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_{ij}/B_{ij}/C_{ij} \quad (3)$$

计算  $A_j/B_j/C_j$  均方差,即

$$R(A_j/B_j/C_j) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [A_{ij}/B_{ij}/C_{ij} - E(A_j/B_j/C_j)]^2} \quad (4)$$

计算影响因素单排序权重系数,即

$$x_j/y_j/z_j = R(A_j/B_j/C_j) / \sum_{j=1}^5 R(A_j/B_j/C_j) \quad (5)$$

#### 2.4.2 确定影响因素综合权重系数步骤公式

计算影响因素单排序权重均值,即

$$E_j = \frac{1}{3}(x_j + y_j + z_j) \quad (6)$$

计算影响因素单排序权重均方差,即

$$O_j = \sqrt{\frac{1}{3} [(x_j - E_j)^2 + (y_j - E_j)^2 + (z_j - E_j)^2]} \quad (7)$$

计算影响因素综合权重系数,即

$$\omega_j = O_j / \sum_{j=1}^5 O_j \quad (8)$$

### 2.5 训练资源配置方案数据无量纲化处理

结合训练流程分析和组训经验,拟制资源配置备选方案,并经提炼整理后形成备选方案集  $S$ ,如表 2 所示。

采用 Min-Max 标准化方法<sup>[27]</sup>对表 2 方案数据进行无量纲化处理,消除各数值量纲不一致的问题,即:

$$t_{qj} = \frac{T_{qj} - T_{qj\min}}{T_{qj\max} - T_{qj\min}} \quad (9)$$

式中: $t_{qj}(q=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,5)$ 为方案数据

标准化后的数据值; $T_{qj}$ 为方案原始数据, $T_{qj\max}$ 、 $T_{qj\min}$ 分别为表 2 中各列数据的最大值和最小值。

表 2 训练资源配置方案数据

Tab. 2 Data sheet of training resource allocation scenario

方案序号	无人训练机配置数量	电池配置数量	充电设备配置数量	机体训练完好率/%	现场修复率/%
$S_1$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{14}$	$T_{15}$
$S_2$	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	$T_{24}$	$T_{25}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$S_n$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$	$T_{n4}$	$T_{n5}$

### 2.6 资源配置效率评价与方案优选排序

综合 2.4.2 节影响因素综合权重系数  $\omega_j$  与 2.5 节无量纲化处理后的方案数据  $t_{qj}$ ,通过线性加权综合法计算资源配置效率综合评价系数  $K_q(\omega)$ ,计算公式如下:

$$K_q(\omega) = \sum_{j=1}^5 t_{qj} \omega_j \quad (10)$$

式中, $K_q(\omega)$ 越大,表示该训练资源配置方案效率更优,对比  $K_q(\omega)$ 即可实现对多个训练资源配置方案效率评价与优选。

## 3 无人机飞行训练资源配置效率评价实例

以某无人机培训班多旋翼无人机飞行训练过程为例,参训人数 30,一个教学日完整飞行训练约 360 min,一个月设置 22 个教学日。

### 3.1 训练过程基础参数

训练仿真系统中多旋翼飞行训练过程基础参数设置,如表 3 所示。

### 3.2 飞行训练过程仿真系统构建

按照 2.2.2 节中仿真系统的设计构想,以满足人均有效训练时间(1 h/(人·d))、人数最大化为前提,以训练资源周转效率最大化为目标,

利用

表3 飞行训练过程基础参数

Tab. 3 Basic parameters on the flight training process

环节	时间消耗参数	资源占用情况
检查调试	3~5 min	1架训练机; 1块动力电池; 1名参训人员
展开训练	4~6 min/(人·次) 可7人同时训练	1架训练机; 1块动力电池; 1名参训人员
电池保障	20~30 min	1架训练机; 1块动力电池; 1台专业充电设备
现场维修	10~30 min	1架训练机; 1块动力电池; 1名参训人员

Arena 仿真建模软件,综合应用 Create(创建模块)、Batch(打包模块)、Separate(分离复制模块)、Process(过程模块)等单元构建训练流程动

态逻辑模型,通过 Decide(条件判断模块)和 Assign(变量定义模块)组合实现逻辑关系判断,并设置可视化插件对训练资源动态变化进行监视,实现无人机飞行训练仿真系统,系统界面如图6所示。

以某阶段已结课的无人机培训班资源配置方案作为样本数据对仿真系统有效性进行检验。资源配置情况如表4所示,样本中飞行训练过程各项基础参数与表3保持一致。按照22个教学日运行仿真系统后,将仿真系统输出的达标人数与样本中达标人数进行对比。仿真系统输出达标人数结果(13人)与样本训练达标人数结果(12人)误差仅为8.3%(小于10%),仿真系统与实际训练情况基本相符,该仿真系统有效,可用于后续综合评价步骤。

### 3.3 影响因素权重系数确定

**Step 1:**运行3.2节无人机飞行训练仿真系统,输入训练资源配置基准方案作为仿真系统初始方案,基准方案数据如表5所示。

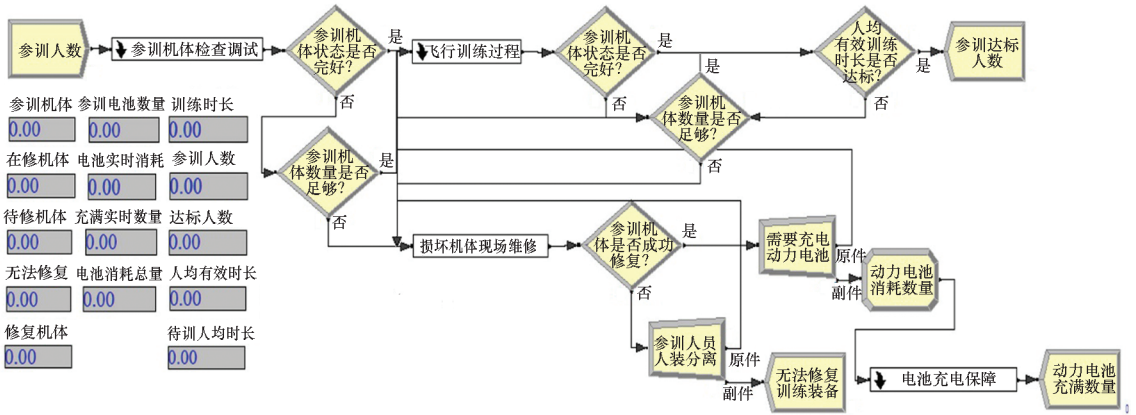


图6 无人机飞行训练仿真系统界面

Fig. 6 System interface of UAV flight training simulation

表4 样本数据训练资源配置

Tab. 4 Allocation of training resources in the sample

名称	数量
参训规模/人	30
无人训练机配置数量	10
电池配置数量	160
充电设备配置数量	10
现场修复率/%	80
机体训练完好率/%	30

表5 训练资源配置基准方案

Tab. 5 Reference project of training resources allocation

名称	数量
无人训练机配置数量	10
电池配置数量	120
充电设备配置数量	10
现场修复率/%	40
机体训练完好率/%	30

**Step 2:**采用单变量数值仿真法,按照2.3节所述步骤方法分别对影响因素集U中各因素仿真获得对应指标值,如表6~8所示。

**Step 3:**采用均方差决策法,按照2.4.1节所述步骤公式分别获得5个影响因素对应的层次单排序权重 $x_j, y_j, z_j$ ,如表9所示。

表 6 训练达标能力指标  $P_1$  指标值

Tab.6 Value of training compliance indicator  $P_1$

仿真组数	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
2	0.23	0.27	0.50	0.53	0.63
3	0.20	0.37	0.43	0.60	0.70
4	0.23	0.47	0.50	0.70	0.77
5	0.60	0.60	0.50	0.50	0.73
6	0.70	0.63	0.53	0.57	0.83
7	0.70	0.63	0.53	0.53	0.97
8	0.67	0.63	0.53	0.30	0.90

表 7 训练资源周转指标  $P_2$  指标值

Tab.7 Value of training resource turnover indicator  $P_2$

仿真组数	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1	168.81	168.81	168.81	168.81	168.81
2	202.10	161.90	146.17	155.30	198.99
3	205.66	162.20	166.74	167.51	194.60
4	194.04	163.52	176.98	173.76	202.72
5	130.72	184.35	150.58	150.75	194.79
6	113.33	184.73	161.42	137.38	205.55
7	116.34	184.60	160.78	168.74	201.18
8	116.67	184.60	160.78	92.88	191.04

表 8 资源最大等待时间  $P_3$  指标值

Tab.8 Value of the maximum wait time for resources  $P_3$

仿真组数	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00
2	144.82	135.23	98.18	101.91	117.64
3	147.95	143.77	59.27	61.95	68.41
4	148.64	150.27	54.64	55.95	61.86
5	141.59	165.41	54.91	54.68	56.59
6	139.00	166.27	54.59	55.36	56.55
7	139.05	166.41	54.59	55.14	57.50
8	139.86	166.41	54.59	55.05	57.68

表 9 影响因素层次单排序权重系数

Tab.9 Hierarchical single sorting weight coefficient of influencing factors

项目	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
$R(A_j)$	0.25	0.19	0.12	0.17	0.25
$R(B_j)$	41.03	11.14	9.83	26.72	11.50
$R(C_j)$	7.73	16.62	26.72	26.96	28.59
$x_j$	0.25	0.19	0.13	0.18	0.25
$y_j$	0.41	0.11	0.10	0.27	0.11
$z_j$	0.07	0.16	0.25	0.25	0.27

Step 4: 采用均方差决策法,按照 2.4.2 节所述步骤公式分别获得 5 个影响因素的综合权重系数  $\omega_j = (0.399, 0.094, 0.192, 0.115, 0.200)$ 。

### 3.4 训练资源配置效率评价与方案优选

Step 1: 基于飞行训练流程分析,综合现有训练资源、购置预算经费、仿真系统运行结果及学员操控熟练水平等多方面制约因素,拟制资源配置初步方案,按照影响因素提炼数据、分类整理后得到资源配置备选方案集  $S$ ,如表 10 所示。

表 10 训练资源配置备选方案集  $S$

Tab.10 Training resource allocation alternative set  $S$

方案序号	无人训练机配置数量	电池配置数量	充电设备配置数量	机体训练完好率/%	现场修复率/%
$S_1$	10	300	10	70	80
$S_2$	15	250	15	70	80
$S_3$	20	190	20	70	80
$S_4$	25	160	25	60	70
$S_5$	30	130	30	60	70

Step 2: 采用 Min-Max 标准化方法,按照 2.5 节所述公式依次对方案集  $S$  资源配置数据进行无量纲化处理,如表 11 所示。

表 11 训练资源配置备选方案集  $S$ (无量纲化)

Tab.11 Training resource allocation alternative set  $S$  (Nondimensionalization)

方案序号	无人训练机配置数量	电池配置数量	充电设备配置数量	机体训练完好率	现场修复率
$S_1$	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
$S_2$	0.25	0.71	0.25	1.00	1.00
$S_3$	0.50	0.35	0.50	1.00	1.00
$S_4$	0.75	0.18	0.75	0.00	0.00
$S_5$	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00

Step 3: 采用线性加权综合法,按照 2.6 节所述步骤公式分别计算获得 5 个备选方案综合评价系数  $K_q(\omega) = (0.409, 0.529, 0.644, 0.460, 0.591)$ 。

由综合评价系数  $K_q(\omega)$  对比可得,训练资源配置备选方案优选排序为: $S_3 > S_5 > S_2 > S_4 > S_1$ , 即  $S_3$  方案训练资源配置效率优于其他方案。因

此,建议选择  $S_3$  方案为该无人机培训班飞行训练资源配置方案。

### 3.5 优选方案验证

为了验证  $S_3$  方案的优越性,将该方案导入“无人机飞行训练资源配置效率评价实例”中的无人机培训班训练过程进行模拟。结果显示,在同样训练时间内, $S_3$  资源配置方案下的训练达标人数由原方案的 12 人增加到 30 人,增幅达 250%,达到了预期效果。同时,在实际组训中,一方面进行训练资源调配与购置补充时,须以  $S_3$  方案作为各训练资源的配置目标,避免以往“越多越好”的粗放式配置;此外,在预算和课时分配调整时,按  $S_3$  方案中影响因素综合权重顺序安排先后主次,将有限的时间和经费花在“刀刃上”。

## 4 结论

训练资源配置效率评价是衡量训练过程资源配置合理性、组训科学性的重要手段和有效措施。本文融合 AHP 理论和 Arena 仿真建模技术,将模拟仿真分析取代人为主观评价,建立了无人机飞行训练资源配置效率综合评价体系,概括了基于 AHP-Arena 方法评价步骤,其核心步骤在于准确构建训练模拟仿真系统,仿真系统越贴合实际运行过程,权重系数越合理。该综合评价方法的创新性主要可概括以下三个方面:

1) 该综合评价方法中层次单排序和综合权重系数是基于真实训练过程的仿真系统模拟分析和均方差计算综合确定,无人评价步骤,极大地降低了人为判断时个人主观片面性影响,提高了权重确定的客观性、简便性和科学性,但对仿真系统构建的准确性要求较高。此外,通过训练流程动态逻辑模型及参数的调整变化可灵活根据训练的创新发展升级优化,增强了方法的时效性、适应性和成长性。

2) 该方法可以有效辅助组训单位或个人解决三个方面问题:一是预估资源配置方案训练效果;二是已知参训规模情况下拟制资源配置方案;三是基于现有训练资源评估承训规模。

3) 该综合评价方法思路和模型可进一步推广至其他类似训练过程,亦可为其他多因素、多指标评价决策过程提供借鉴,具有较高的可复用性、较强的实践性和良好的扩展性。

## 参考文献 (References)

[1] 李富良,李元元,黄杰,等. 美陆军无人机训练研究[J]. 国防科技, 2019, 40(3): 60-64.

LI F L, LI Y Y, HUANG J, et al. Research on the training of the U. S. army UAV[J]. National Defense Technology, 2019, 40(3): 60-64. (in Chinese)

[2] SAATY T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation [M]. New York: McGraw-Hill Company, 1980.

[3] 杨维. 关于分要素内部控制评审的研究: 基于问卷调查的结果[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.

YANG W. Study on internal control evaluation and audit by components—based on the evidences of questionnaires [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[4] 曾德林, 鲁军勇, 郑宇锋. 电磁发射系统改进 FAHP-神经网络健康评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(6): 67-76.

ZENG D L, LU J Y, ZHENG Y F. Improved FAHP-neural network health evaluation method for electromagnetic launch system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(6): 67-76. (in Chinese)

[5] FORMAN E H, GASS S I. The analytic hierarchy process—an exposition [J]. Operations Research, 2001, 49(4): 469-486.

[6] 刘建华, 魏铭冠, 刘意先. 基于 AHP-TOPSIS 的渗透测试工具的综合评价模型[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(2): 322-326.

LIU J H, WEI M G, LIU Y X. Comprehensive evaluation model of penetration tools based on AHP-TOPSIS [J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(2): 322-326. (in Chinese)

[7] 周云. 基于 SLA 建模和模糊 AHP 的军事通信网络系统保障效能综合评估模型[J]. 通信技术, 2021, 54(2): 402-409.

ZHOU Y. Comprehensive effectiveness evaluation model based on SLA modeling and fuzzy AHP in military communication network system [J]. Communications Technology, 2021, 54(2): 402-409. (in Chinese)

[8] 王彪, 赵建新, 陈兵, 等. 基于改进 AHP 的无人机作战能力量化研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(6): 115-120.

WANG B, ZHAO J X, CHEN B, et al. Quantitative research on UAV combat capability based on improved AHP[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(6): 115-120. (in Chinese)

[9] BADRI M A. A combined AHP-GP model for quality control systems[J]. International Journal of Production Economics, 2001, 72(1): 27-40.

[10] KORPELA J, KYLÄHEIKO K, LEHMUSVAARA A, et al. An analytic approach to production capacity allocation and supply chain design[J]. International Journal of Production Economics, 2002, 78(2): 187-195.

[11] JUNG H W, CHOI B. Optimization models for quality and cost of modular software systems [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112(3): 613-619.

[12] RAJA A A, ARJUN M, ANISHKUMAR M. A collaborative application of AHP to enhance a routing model for logistics and reverse logistics[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 11(9): 6105-6109.

[13] 鞠儒生, 朱正秋, 曾云秀, 等. 基于 AHP 和熵值模型的军事竞赛研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 679-690.



- JU R S, ZHU Z Q, ZENG Y X, et al. Research and simulation for military contests based on AHP and entropy models[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(2): 679-690. (in Chinese)
- [14] 崔凯旋, 张成, 石全. 装备保障训练评估方法及仿真分析[J]. *计算机仿真*, 2013, 30(4): 331-335.  
CUI K X, ZHANG C, SHI Q. Evaluation method and simulation analysis for equipment support training [J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(4): 331-335. (in Chinese)
- [15] KELTON W D, SADOWSKI R P, STURROCK D T. *Simulation with Arena*[M]. 4th ed. New York: Mcgraw Hill, 2006.
- [16] 许树柏. 层次分析法原理: 实用决策方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.  
XU S B. AHP principles: a practical decision-making approach[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. (in Chinese)
- [17] 李升泽, 蒋蓉华. 用 Delphi 实现基于 AHP 层次分析的 KPI 赋权研究[J]. *计算机工程与科学*, 2008, 30(2): 37-38.  
LI S Z, JIANG R H. Research on the implementation of KPI weight assignment based on AHP using Delphi[J]. *Computer Engineering & Science*, 2008, 30(2): 37-38. (in Chinese)
- [18] 商勇. 船舶制造企业管子车间生产计划与调度的仿真及优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
SHANG Y. Simulation and optimization research on production planning and scheduling of pipe processing workshop in shipbuilding enterprises [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [19] 卢开澄, 卢华明. 组合数学[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
LU K C, LU H M. *Combinatorial mathematics*[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [20] 王明涛. 多指标综合评价中权重确定的离差、均方差决策方法[J]. *中国软科学*, 1999(8): 100-101.  
WANG M T. A decision method of dispersion and mean squared error determined by weights in comprehensive evaluation of multiple indicators [J]. *China Soft Science*, 1999(8): 100-101. (in Chinese)
- [21] 陈珽. 决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
CHEN T. *Strategic analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [22] 王亚彬, 刘文龙, 孙保琛, 等. 基于 ARENA 的某火炮维修保障过程建模与仿真[J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(3): 222-224, 227.  
WANG Y B, LIU W L, SUN B C, et al. Modeling and simulation of a type of gun's maintenance support process based on ARENA[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(3): 222-224, 227. (in Chinese)
- [23] 曹兴飞, 赵永涛, 曹方全, 等. 基于 ARENA 的沿海港口航道通过能力仿真研究[J]. *中国水运*, 2017, 17(12): 96-97, 187.  
CAO X F, ZHAO Y T, CAO F Q, et al. [J]. *China water transport*, 2017, 17(12): 96-97, 187. (in Chinese)
- [24] 王维平, 朱一凡, 李群, 等. 离散事件系统建模与仿真[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.  
WANG W P, ZHU Y F, LI Q, et al. *Discrete event system modeling and simulation* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [25] 徐静安. 第三讲 关于单因素考察实验研究的讨论[J]. *上海化工*, 2016, 41(7): 10-14.  
XU J G. Lecture 3 Discussion on experimental research of single-factor inspection [J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2016, 41(7): 10-14. (in Chinese)
- [26] 宋之杰, 高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法[J]. *燕山大学学报*, 2002, 26(1): 20-22, 26.  
SONG Z J, GAO X H. A method of index weight setting in multi-criteria synthetical evaluation[J]. *Journal of Yanshan University*, 2002, 26(1): 20-22, 26. (in Chinese)
- [27] 王正鹏, 谢志鹏, 邱培超. 语义关系相似度计算中的数据标准化方法比较[J]. *计算机工程*, 2012, 38(10): 38-40.  
WANG Z P, XIE Z P, QIU P C. Comparison of data standardization method in semantic relation similarity calculation [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(10): 38-40. (in Chinese)