

8-17-2020

Evaluation Method of Training Simulation Result Based on Grey Clustering and Analytic Hierarchy Process

Zhaobin Wu

1. Computer Department of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;;2. Unit 63961 PLA, Beijing 100012, China;;

Chen Li

3. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

Chunxia Zhao

1. Computer Department of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Evaluation Method of Training Simulation Result Based on Grey Clustering and Analytic Hierarchy Process

Abstract

Abstract: An evaluation method based on grey relational analytic hierarchy process was proposed in order to improve rationality of evaluation training result of portable anti-air missile training simulation system. *The evaluating indicators including definitions and calculation equations were proposed from three aspects including accuracy, rapidity and stationarity.* The weights of the evaluating indicators were calculated by analytic hierarchy process of multiple experts, and the scores of the evaluating indicators were given by 0-1 process and grey clustering evaluation, and using the weights and scores of the evaluating indicators the training score could be obtained. An example of evaluation training result of a certain type portable anti-air missile training simulation system was given, which shows the rationality and the superiority of the proposed evaluation method.

Keywords

training simulation, evaluating indicator, grey clustering, analytic hierarchy process

Recommended Citation

Wu Zhaobin, Chen Li, Zhao Chunxia. Evaluation Method of Training Simulation Result Based on Grey Clustering and Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 416-424.

基于灰色聚类 and 层次分析的模拟训练成绩评定

武兆斌^{1,2}, 陈黎³, 赵春霞¹

(1. 南京理工大学计算机科学与技术, 南京 210094; 2. 63961 部队, 北京, 100012; 3. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘要: 为提高便携式防空导弹模拟训练成绩评定的合理性, 给出一种基于灰色聚类和层次分析的综合评定方法。从准确性、快速性和平稳性 3 个方面建立了便携式防空导弹模拟训练成绩的评价指标体系, 给出各指标的定义和计算公式; 利用多专家层次分析法, 计算了各指标的评价权重, 进一步通过 0-1 法和灰色聚类评估法得到了各指标的评分, 并综合各指标的评价权重对射手的训练成绩进行了综合评定; 最后以某型便携式防空导弹模拟训练系统训练成绩评定为例说明了成绩评定方法的合理性。

关键词: 模拟训练; 评价指标; 灰色聚类; 层次分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 02-0416-09

Evaluation Method of Training Simulation Result Based on Grey Clustering and Analytic Hierarchy Process

Wu Zhaobin^{1,2}, Chen Li³, Zhao Chunxia¹

(1. Computer Department of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Unit 63961 PLA, Beijing 100012, China; 3. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: An evaluation method based on grey relational analytic hierarchy process was proposed in order to improve rationality of evaluation training result of portable anti-air missile training simulation system. The evaluating indicators including definitions and calculation equations were proposed from three aspects including accuracy, rapidity and stationarity. The weights of the evaluating indicators were calculated by analytic hierarchy process of multiple experts, and the scores of the evaluating indicators were given by 0-1 process and grey clustering evaluation, and using the weights and scores of the evaluating indicators the training score could be obtained. An example of evaluation training result of a certain type portable anti-air missile training simulation system was given, which shows the rationality and the superiority of the proposed evaluation method.

Key words: training simulation; evaluating indicator; grey clustering; analytic hierarchy process

引言

便携式防空导弹主要承担低空、超低空防空任务, 具有机动灵活、反应迅速、抗干扰能力强等特

点, 目前已成为国土、要地和野战防空不可或缺的防空兵器^[1]。为了满足防空部队的训练需要, 减少实装动用频次, 降低训练费用和训练的危险性, 基于虚拟现实技术的便携式防空导弹模拟训练装备得到了广泛应用。对导弹射手来说, 其搜索、瞄准跟踪、截获解锁和发射等操作动作的熟练程度和准确性, 直接影响便携式防空导弹实战射击的命中率。因此, 如何客观合理地对导弹射手的操作过程



收稿日期: 2014-10-21 修回日期: 2014-11-29;
作者简介: 武兆斌(1973-), 男, 山西灵丘, 博士, 高工, 研究方向为地空导弹总体技术; 陈黎(1981-), 男, 湖南长沙, 博士, 高工, 研究方向为指控系统总体设计; 赵春霞(1964-), 女, 北京, 博导, 教授, 研究方向为计算机应用技术以及模式识别与智能系统。

<http://www.china-simulation.com>

进行成绩评定, 以有效提高导弹射手的操作水平, 是便携式防空导弹模拟训练装备的一项关键技术。

关于训练成绩的评定方法, 众多学者进行了大量研究。文献[2]建立了训练成绩的评价指标, 给出了各指标的评价权重, 但是评价指标单一, 不能充分地反映出射手的训练水平; 文献[3]通过查表法进行训练成绩评定, 但是由于没有量化各评价指标的权重和分数, 因此评价结果采用的是分级制, 而非分数制。文献[4-5]采用 AHP 评价方法对射手的训练成绩进行了评定, 建立了评价指标体系, 计算了各指标的权重和分数, 但是在计算各指标的分数时, 针对不同难度的训练科目, 采用的是相同的评价标准, 因此评价模型的合理性有待进一步提高。此外, 近年来灰色系统理论在进行综合量化评价时, 取得了显著的评判效果^[6-9], 特别适合处理少数数据、贫信息的评价问题, 同时考虑到训练成绩评定中的评价标准由于信息量小, 往往较难确定, 因此利用灰色系统理论进行综合量化评价, 将为训练成绩的评定提供一条新思路。

基于此, 本文给出了一种基于灰色聚类和层次分析的便携式防空导弹模拟训练成绩评定方法。首先根据对导弹射手操作过程的分析, 建立了由准确性、快速性和稳定性等指标构成的训练成绩评定两级评价指标体系; 然后利用层次分析法计算了各评价指标的权重, 并且考虑到由单个专家给出的评价权重存在主观片面性, 这里由多个专家分别给出指标权重, 然后再用最小偏差法计算指标的综合权重; 进一步采用 0-1 法得到准确性指标的评分, 同时采用灰色聚类评估法得到其他指标的评分, 再综合各指标的评价权重对射手的训练成绩进行了综合评定; 最后通过实例验证了本文提出的成绩评定方法的合理性。

1 训练成绩评价指标体系的建立

1.1 评价指标体系的建立

建立训练评价指标体系, 是研制便携式防空

导弹模拟训练系统的一个重要环节。建立的评价指标体系不仅要反映便携式防空导弹的战术技术性能, 而且是导弹射手训练成绩的判定依据。一般地, 便携式防空导弹采用红外制导体制, 对导弹射手来说具有发射后不管的特点, 要利用便携式防空导弹成功拦截来袭目标, 就需要导弹射手在导弹发射前准确快速平稳地完成一系列操作动作, 包括目标搜索、瞄准目标、跟踪目标、截获目标、导弹解锁和发射导弹等, 这些动作的完成质量直接影响了便携式防空导弹实战射击的命中概率。因此, 这里根据导弹射手在训练过程中完成上述操作动作的准确性、快速性和平稳性, 对射手的训练成绩进行综合评定, 评价指标体系如图 1 所示。

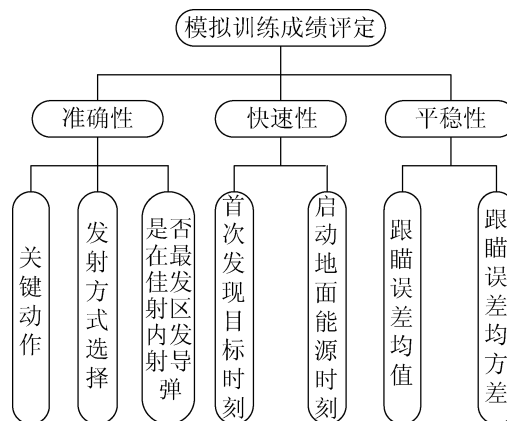


图 1 训练成绩评价指标体系

从图 1 可以看出, 这里构建了训练成绩评定的两级评价指标体系, 下面具体对指标体系中的各评价指标逐一进行说明。

1.2 准确性指标

准确性指标考核的是导弹射手操作动作的准确程度, 包括关键动作的准确性、发射方式的选择是否合适以及是否在最佳发射区内发射导弹。

1.2.1 关键动作 P_1

关键动作是指导弹射手发射导弹前一系列操作动作中的关键步骤, 具体包括:

- 1) 大/小目标设置 P_{11}

定义 1: 根据不同的目标类型, 设置相应的目标参数。参数设置正确则 $P_{11}=1$, 否则 $P_{11}=0$ 。

若目标类型为“固定翼飞机”或“直升机”等大体积目标, 导弹射手应将目标类型开关置为大目标; 若目标类型为“巡航导弹”等小体积目标, 导弹射手应将目标类型开关置为小目标。

2) 攻击方式设置 P_{12}

定义 2: 根据目标与导弹射手的相对运动趋势, 设置迎攻或者尾追攻击方式。攻击方式设置正确则 $P_{12}=1$, 否则 $P_{12}=0$ 。

发射导弹时, 若目标与导弹射手的相对运动趋势为接近导弹射手方向, 射手应将迎攻/尾追转换开关置为迎攻状态; 若目标与导弹射手的相对运动趋势为远离导弹射手方向, 射手应将迎攻/尾追转换开关置为尾追状态。

3) 启动地面能源 P_{13}

定义 3: 地面能源启动标志。启动了地面能源则 $P_{13}=1$, 否则 $P_{13}=0$ 。

若导弹射手拨动地面能源开关, 则启动地面能源。

4) 截获目标 P_{14}

定义 4: 导引头处于搜索工作状态, 扫描到目标后, 出现声光提示信号, 则截获目标。此时 $P_{14}=1$; 若没有出现声光提示信号, 则 $P_{14}=0$ 。

导弹射手稳定地跟瞄目标一段时间后, 即可出现截获目标的声光提示信号。

5) 解锁 P_{15}

定义 5: 导弹射手截获目标后, 扣动第一档扳机, 则导弹解锁。此时 $P_{15}=1$; 若导弹射手没有截获目标, 或者截获目标后没有扣动第一档扳机, 或者截获目标后扣动第一档扳机又松开扳机, 则 $P_{15}=0$ 。

6) 发射导弹时机是否合适 P_{16}

定义 6: 导弹射手扣动第二档扳机发射导弹的时机是否合适。若导弹射手在满足下列所有条件时发射导弹, 则 $P_{16}=1$, 否则 $P_{16}=0$ 。具体条件包括:

a. 应在启动地面能源 t_{\min} 秒之后 t_{\max} 秒之前发射导弹, 其中 t_{\min} 表示导弹的最短准备时间, t_{\max} 表示导弹的最长准备时间;

b. 应在目标进入发射区后离开发射区前扣压扳机;

c. 若目标发射诱饵弹, 应在目标发射诱饵弹 t 秒之后扣压扳机, t 满足:

$$t = d \cdot \tan(\alpha / 2) / v \quad (1)$$

其中, d 表示目标与导弹射手的距离, α 表示导引头扫描视场角, v 表示诱饵弹相对目标的飞行速度。

d. 应在太阳禁射夹角以外发射导弹。

考虑到上述 6 个关键动作的完成情况对便携式防空导弹的命中概率有显著影响, 一旦其中一个关键动作操作失误, 都将极大降低导弹的命中概率, 甚至将使导弹不能命中目标。因此只有当所有关键动作都准确完成时, $P_1=1$; 否则 $P_1=0$ 。

1.2.2 发射方式选择 P_2

定义 7: 根据目标相对导弹射手的视线角速度, 选择合适的发射方式。若选择了合适的发射方式, 则 $P_2=1$, 否则 $P_2=0$ 。

若视线角速度 $> \omega$, 射手应将扳机由原始位置直接扣压到底, 即选择一扣到底的发射方式; 若视线角速度 $< \omega$, 射手应将扳机由原始位置扣压到第一档后稍作停顿, 再扣压到第二档, 即选择先一档再二档的发射方式。

1.2.3 是否在最佳发射区内发射导弹 P_3

定义 8: 发射导弹时, 目标是否位于导弹的最佳发射区内。若导弹射手在最佳发射区内发射导弹, 则 $P_3=1$, 否则 $P_3=0$ 。

导弹射手应尽量待目标进入最佳发射区后, 离开最佳发射区前发射导弹。

1.3 快速性指标

快速性指标考核的是导弹射手的反应速度以及操作动作的快速性, 包括首次发现目标时刻以及启动地面能源时刻。

1.3.1 首次发现目标时刻 P_4

定义 9: 目标首次进入导引头搜索视场的时刻。

1.3.2 启动地面能源时刻 P_5

定义 10: 导弹射手启动地面能源的时刻。

1.4 平稳性指标

平稳性考核的是导弹射手在首次发现目标时刻到导弹解锁, 以及导弹解锁到发射导弹两个时间段内跟瞄误差的统计特性, 包括跟瞄误差均值和跟瞄误差均方差。在第一个时间段内导引头处于搜索工作状态, 在第二个时间段内导引头处于跟踪工作状态。

1.4.1 跟瞄误差均值 P_6

$$p_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (2)$$

1.4.2 跟瞄误差均方差 P_7

$$p_7 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - p_{11})^2} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中的 e_i 表示 2 个时间段内的跟瞄误差; N 表示两个时间段内跟瞄误差的采样次数。

2 训练成绩综合评定模型

2.1 基于多专家层次分析法的评价指标权重确定

层次分析法将定性和定量相结合, 是一种被广泛应用的确定指标权重的有效方法^[10]。设评价指标 x_i 和 x_j 成对比较时, 其相对重要程度可用表 1 中数值 a_{ij} 所示。

表 1 a_{ij} 的取值含义

a_{ij}	含义
1	表示两指标相比同等重要
3	表示两指标相比 x_i 比 x_j 稍重要
5	表示两指标相比 x_i 比 x_j 明显重要
7	表示两指标相比 x_i 比 x_j 强烈重要
9	表示两指标相比 x_i 比 x_j 绝对重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

当有 n 个指标成对比较时, 可得到如下判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

当判断矩阵 A 的阶数 $n > 2$ 时, 指标间的相对重要程度容易出现不一致的情况, 因此需要利用式(5)对判断矩阵 A 进行一致性检验。

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \quad R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (5)$$

其中, λ_{\max} 表示判断矩阵的最大特征值; I_C 是判断矩阵的一致性指标; I_R 是判断矩阵的平均随机一致性指标; R_C 称为判断矩阵的随机一致性比率。当 $R_C < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

当判断矩阵 A 通过一致性检验后, 即可利用式(6)计算各评价指标的权重。

$$A\mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w} \quad (6)$$

其中: \mathbf{w} 是属于判断矩阵 A 的特征值 λ_{\max} 的特征向量, 即为所求的评价指标权重向量。

从以上描述可以看出, 构造合适的判断矩阵是层次分析法的关键, 如果仅根据单个专家的经验来建立判断矩阵, 往往带有主观片面性, 所以, 这里由多个专家分别建立判断矩阵并计算各自的评价指标权重向量, 最后再根据各专家的可信度并利用加权最小偏差法计算合成的评价指标权重向量。

这里专家的可信度是指专家能够客观、准确地计算评价指标权重的程度。在此定义下, 可以认为专家个体与专家群体评价意见的一致性程度越高, 则专家个体的可信度越大, 反之则认为专家个体的可信度越低^[11]; 并且专家个体的可信度还要能反映各专家的历史评价情况^[12]。综合考虑, 这里给出如下所述的专家可信度计算公式。

$$c_j = \frac{\sum_{l=1}^{N_e} c_{j,l}}{N_e} \quad (7)$$

其中: c_j 表示第 j 个专家的可信度; N_e 表示第 j

个专家历史上的评价次数； $c_{j,l}$ 表示根据第 j 个专家历史上在进行第 l 次评价时的评价情况计算出的专家 j 的可信度，这里 $c_{j,l}$ 根据式(8)确定。

$$c_{j,l} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\omega_{i,j,l} - \omega_{i,l}|}{\omega_{i,l}} \quad (8)$$

式中： $\omega_{i,j,l}$ 表示第 j 个专家历史上在进行第 l 次评价时给出的第 i 个指标的权重； $\omega_{i,l}$ 表示第 j 个专家历史上在进行第 l 次评价时第 i 个指标的综合权重。

进一步，设 m 个专家给出的由 n 个评价指标构成的权重向量分别为

$$\mathbf{w}_j = [\omega_{1,j}, \omega_{2,j}, \dots, \omega_{n,j}], j = 1, 2, \dots, m$$

其中， $\omega_{i,j}$ 满足 $\sum_{i=1}^n \omega_{i,j} = 1, j = 1, 2, \dots, m$ ； m 个专家的可信度为 $c_j \in (0, 1), j = 1, 2, \dots, m$ 。构建如下最小偏差模型，

$$\begin{aligned} \min \sum_{j=1}^m c_j (\mathbf{w} - \mathbf{w}_j)(\mathbf{w} - \mathbf{w}_j)^T \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9) \\ \text{s.t. } \mathbf{e}\mathbf{w}^T = 1, \mathbf{w} \geq \mathbf{0}_{1 \times n} \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{w} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 表示合成后的评价指标权重向量； $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}$ 。从式(9)可以看出，为了最小化目标函数，合成后的评价指标权重向量 \mathbf{w} 应更接近可信度高的专家给出的权重向量。进一步将式(9)整理为：

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}\mathbf{H}\mathbf{w}^T + \mathbf{F}^T \mathbf{w}^T \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10) \\ \text{s.t. } \mathbf{B}\mathbf{w}^T \geq \mathbf{E} \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{H} = 2 \sum_{j=1}^m c_j \mathbf{I}_n, \mathbf{F} = -2 \sum_{j=1}^m c_j \mathbf{w}_j^T, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ -\mathbf{e} \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix}$,

$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ \mathbf{0}_{m \times 1} \end{bmatrix}$ 。从式(10)可以看出，上述最小偏差模型

可以转化为一个带不等式约束的二次规划问题，该问题适合采用起作用集方法进行求解^[13]，求解步骤如下所述：

步骤 1：给定初始可行点 $\mathbf{w}^{(1)}$ ，相应的起作用约束指标集 $\Omega^{(1)}$ ，置 $k = 1$ ；

步骤 2：令 $\boldsymbol{\delta} = \mathbf{w} - \mathbf{w}^{(k)}$ ，求解二次规划

$$\begin{aligned} \min \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}\mathbf{H}\boldsymbol{\delta}^T + \nabla f(\mathbf{w}^{(k)})^T \boldsymbol{\delta}^T \\ \text{s.t. } \mathbf{b}^i \boldsymbol{\delta} = 0, i \in \Omega^{(k)} \end{aligned}$$

设其最优解为 $\boldsymbol{\delta}^{(k)}$ 。若 $\boldsymbol{\delta}^{(k)} = \mathbf{0}$ ，则进行步骤 5；否则，进行步骤 3；

步骤 3：令 $\mathbf{d}^{(k)} = \boldsymbol{\delta}^{(k)}$ ，由 $\alpha_k = \min\{1, \hat{\alpha}_k\}$ 确定 α_k ，其中：

$$\hat{\alpha}_k = \min \left\{ \frac{e_i - \mathbf{b}^i \mathbf{w}^{(k)}}{\mathbf{b}^i \mathbf{d}^{(k)}} \mid i \notin \Omega^{(k)}, \mathbf{b}^i \mathbf{d}^{(k)} < 0 \right\}.$$

令 $\mathbf{w}^{(k+1)} = \mathbf{w}^{(k)} + \alpha_k \mathbf{d}^{(k)}$ ，计算 $\nabla f(\mathbf{w}^{(k+1)})$ ；

步骤 4：若 $\alpha_k < 1$ ，则置 $\Omega^{(k+1)} = \Omega^{(k)} \cup \{p\}$ ， $k = k + 1$ ，返回步骤 2；若 $\alpha_k = 1$ ，记点 $\mathbf{w}^{(k+1)}$ 起作用约束指标集为 $\Omega^{(k+1)}$ ，置 $k = k + 1$ ，进行步骤 5；

步骤 5：计算起作用约束对应的拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}$

$$\boldsymbol{\lambda}^{(k)} = (\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{B}}^T)^{-1} \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{H}^{-1}(\mathbf{H}\mathbf{w}^{(k)} + \mathbf{F})$$

其中， $\tilde{\mathbf{B}}$ 表示约束指标对应的约束方程的系数矩阵，令 $\lambda_i^{(k)} = \min\{\lambda_i^{(k)} \mid i \in \Omega^{(k)}\}$ ，若 $\lambda_i^{(k)} \geq 0$ ，则停止计算，得到最优解 $\mathbf{w}^{(k)}$ ；否则，从 $\Omega^{(k)}$ 中删除 p ，返回步骤 2。

2.2 基于 0-1 法和灰色聚类评估法的评价指标评分

为了便于给出训练成绩，本文采用百分制评分形式对训练成绩进行评定。下面进一步给出各类指标的评分方法。

2.2.1 准确性指标评分

考虑到准确性指标的取值非 0 即 1，因此这里采用 0-1 法对准确性指标进行评分。设准确性指标 $p_j, j = 1, 2, 3$ 的权重分别为 $\omega_j, j = 1, 2, 3$ ，用 0-1 法得到准确性指标的评分，如式(11)所示。

$$G_c = 100 \sum_{j=1}^3 \omega_j p_j \quad (11)$$

式中 G_c 表示准确性指标的得分。从式(11)可以看出，当第 j 项准确性指标 $p_j = 1$ 时，该项准确性指标的得分为 $100\omega_j$ ，而当 $p_j = 0$ 时该项准确性指标的得分为 0。

2.2.2 快速性指标和平稳性指标综合评分

快速性指标和平稳性指标的取值是在一个区间内连续变化, 对这 2 类指标的评分需要建立相应的评价标准, 但是由于评价标准所描述的信息往往较少, 比如仅包含得满分, 得及格分以及得 0 分应到达的程度, 因此如何利用有限的评价标准对这两类指标进行评分是一个值得研究的问题。另外考虑到灰色系统理论特别适合处理少数据、贫信息的评价问题^[14], 基于此这里采用灰色聚类评估法对快速性指标和平稳性指标进行综合评分。

灰色聚类评估法是根据灰数的白化权函数将评价指标划分成若干个可定义类别, 并以此为基础对评价指标进行综合评估的方法, 评估过程主要包括 2 个步骤: 一是根据对评价指标的具体分析, 划分评估灰类并构造相应的白化权函数; 二是根据白化权函数和评价指标的权重, 确定灰色聚类向量并给出综合评分。下面对这两个评估过程逐一进行说明。

1) 划分评估灰类并构造白化权函数

快速性指标和平稳性指标 $p_j, j = 6, 7, 8, 9$ 具有如下特点:

- a. p_j 越小, 得分越高;
- b. 当 $p_j \leq x_{j,\min}$ 时, 得满分; $p_j = x_{j,\text{mid}}$ 得 60 分; 当 $p_j \geq x_{j,\max}$ 时, 得 0 分。

其中: $x_{j,\min}$, $x_{j,\text{mid}}$ 和 $x_{j,\max}$ 分别表示评价指标 p_j 得满分、得 60 分和得 0 分的评价标准, 其大小可以根据以往训练的统计数据, 以及对训练科目的具体分析来确定。

进一步针对快速性指标和平稳性指标的上述特点, 设定 3 个评估灰类: “优”、“及格”、“差”, 并对各评估灰类建立如下所示的白化权函数,

第 1 评估灰类“优”的白化权函数为:

$$f_1(p_j) = \begin{cases} 0 & p_j \notin [0, x_{j,\text{mid}}] \\ 1 & p_j \in [0, x_{j,\min}] \\ \frac{x_{j,\text{mid}} - p_j}{x_{j,\text{mid}} - x_{j,\min}} & p_j \in [x_{j,\min}, x_{j,\text{mid}}] \end{cases} \quad (12)$$

第 2 评估灰类“及格”的白化权函数为:

$$f_2(p_j) = \begin{cases} 0 & p_j \notin [x_{j,\min}, x_{j,\max}] \\ \frac{p_j - x_{j,\min}}{x_{j,\text{mid}} - x_{j,\min}} & p_j \in [x_{j,\min}, x_{j,\text{mid}}] \\ \frac{x_{j,\max} - p_j}{x_{j,\max} - x_{j,\text{mid}}} & p_j \in [x_{j,\text{mid}}, x_{j,\max}] \end{cases} \quad (13)$$

第 3 评估灰类“差”的白化权函数为:

$$f_3(p_j) = \begin{cases} 0 & p_j \in [0, x_{j,\text{mid}}] \\ \frac{p_j - x_{j,\text{mid}}}{x_{j,\max} - x_{j,\text{mid}}} & p_j \in [x_{j,\text{mid}}, x_{j,\max}] \\ 1 & p_j \notin [0, x_{j,\max}] \end{cases} \quad (14)$$

3 个评估灰类的白化权函数的函数图如图 2 所示。

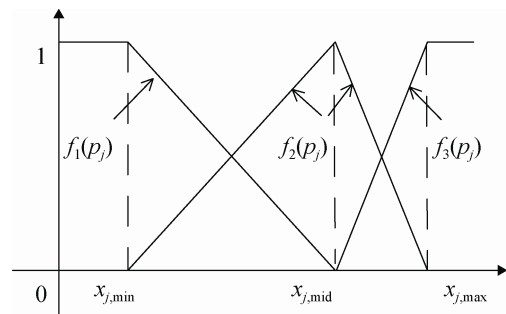


图 2 白化权函数函数图

2) 确定灰色聚类向量并给出综合评分

设快速性指标和平稳性指标 $p_j, j = 6, 7, 8, 9$ 的权重分别为 $\omega_j, j = 6, 7, 8, 9$, 根据第一步得到的白化权函数, 可计算出灰色聚类系数 σ_i 为:

$$\sigma_i = \sum_{j=6}^9 \omega_j f_i(p_j), \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

令 $\sigma \triangleq [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ 表示灰色聚类向量, $C \triangleq [100, 60, 0]$ 表示各评估灰类对应的分值组成的向量, 则快速性指标和平稳性指标的综合评分 G_{rs} 为:

$$G_{rs} = C \cdot \sigma^T \quad (16)$$

2.3 训练成绩综合评定

进一步根据准确性指标的评分 G_c 和权重 ω_c 以及快速性指标和平稳性指标的综合评分 G_{rs} 和综合权重 ω_{rs} , 给出训练成绩的综合评分 G 为

$$G = \omega_c G_c + \omega_{rs} G_{rs} \tag{17}$$

$$\omega_c = \sum_{i=1}^3 \omega_i, \omega_{rs} = \sum_{i=6}^9 \omega_i$$

3 实例分析

下面以某型便携式防空导弹模拟训练系统训练成绩评定为例,对本文提出的成绩评定方法进行实例分析。

某型便携式防空导弹模拟训练系统由模拟训练弹、导演台、目标指示器以及视景显示装置组成,训练装备组成图如图 3 所示。



图 3 模拟训练系统组成

从图 3 可以看出,导演台生成三维场景与目标,经图像融合机处理后,由投影仪投影到融合幕上,导弹射手立于融合幕前,对融合幕上出现的目标进行跟瞄训练。训练成绩采用本文提出的成绩评定方法进行评分,评分步骤如下所述:

步骤 1: 建立如图 1 所示的训练成绩两级评价指标体系;

步骤 2: 计算各指标的评价权重;

两位专家采用层次分析法分别对各指标的评价权重进行了独立计算。1 号专家的计算过程如下所述,

1) 建立一级指标的判断矩阵

$$A_{1,1} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

此时 $R_C = 0.0706 < 0.1$, 满足一致性要求, 进一步计算得到一级指标的权重

$$w_{1,1} = [0.6144 \quad 0.1172 \quad 0.2684]$$

2) 建立二级准确性指标的判断矩阵

$$A_{1,21} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

此时 $R_C = 0.0825 < 0.1$, 满足一致性要求, 进一步计算得到二级准确性指标的权重

$$w_{1,21} = [0.7173 \quad 0.0881 \quad 0.1946]$$

3) 建立二级快速性指标的判断矩阵

$$A_{1,22} = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 \\ 4 & 1 \end{bmatrix}$$

此时 $R_C = 0 < 0.1$, 满足一致性要求, 进一步计算得到二级快速性指标的权重

$$w_{1,22} = [0.2 \quad 0.8]$$

4) 建立二级平稳性指标的判断矩阵

$$A_{1,23} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

此时 $R_C = 0 < 0.1$, 满足一致性要求, 进一步计算得到二级平稳性指标的权重

$$w_{1,23} = [0.25 \quad 0.75]$$

综合一二级指标的评价权重, 得到 1 号专家评价指标的权重向量

$$w_1 = [0.4407 \quad 0.0541 \quad 0.1196 \quad 0.0938 \quad 0.0234 \quad 0.0671 \quad 0.2013]$$

同理得到 2 号专家评价指标的权重向量

$$w_2 = [0.3705 \quad 0.0731 \quad 0.1379 \quad 0.0750 \quad 0.0435 \quad 0.0429 \quad 0.2571]$$

若两位专家的历史评价数据如表 2 所示。

表 2 专家的历史评价数据

专家编号 j	专家历史评价数据		
	$c_{j,1}$	$c_{j,2}$	$c_{j,3}$
1	0.5	0.5	0.8
2	0.95	0.8	0.95

利用表 2 的数据并根据式(7)可计算出两位专家的可信度分别为 $c_1 = 0.9$ 和 $c_2 = 0.6$, 求解式(10)得到合成后的评价指标权重向量

$$w = [0.4100 \quad 0.0624 \quad 0.1276 \quad 0.0856 \quad 0.0322 \quad 0.0565 \quad 0.2257]$$

步骤 3: 计算各指标的评分;

设某训练科目的评价标准为:

$$x_{6,\min} = 4 \text{ s}, \quad x_{6,\text{mid}} = 10 \text{ s}, \quad x_{6,\max} = 15 \text{ s};$$

$$x_{7,\min} = 3 \text{ s}, \quad x_{7,\text{mid}} = 8 \text{ s}, \quad x_{7,\max} = 12 \text{ s};$$

$$x_{8,\min} = 0.5^\circ, \quad x_{8,\text{mid}} = 2^\circ, \quad x_{8,\max} = 3^\circ;$$

$$x_{9,\min} = 0.3^\circ, \quad x_{9,\text{mid}} = 1^\circ, \quad x_{9,\max} = 1.5^\circ;$$

3 位导弹射手针对该训练科目进行训练, 训练过程中各指标的实际测量值为分别为:

$$p_1 = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 3 \quad 2 \quad 0.2 \quad 0.3]$$

$$p_2 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 15 \quad 10 \quad 2.9 \quad 1.45]$$

$$p_3 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 4 \quad 3 \quad 0.8 \quad 0.51]$$

其中: 1 号导弹射手由于攻击方式设置错误, 致使导弹没有命中目标; 2 号和 3 号导弹射手成功命中目标。

3 位导弹射手准确性指标的评分, 由式(11)计算如下:

$$G_{c,1} = 19, \quad G_{c,2} = 60, \quad G_{c,3} = 60$$

3 位导弹射手快速性指标和平稳性指标的综合评分, 由式(16)计算如下:

$$G_{rs,1} = 40, \quad G_{rs,2} = 2, \quad G_{rs,3} = 37$$

步骤 4: 训练成绩综合评定。

进一步根据准确性指标的权重以及快速性指标和平稳性指标的综合权重, 由式(17)计算得到 3 位导弹射手的综合评分为:

$$G_1 = 59, \quad G_2 = 62, \quad G_3 = 97$$

1 号导弹射手虽然动作迅速而且跟瞄误差也很小, 但是由于攻击方式设置错误, 导致导弹没能命中目标, 因此得分没有及格; 2 号射手虽然动作准确, 导弹也成功命中了目标, 但是由于动作不熟练而且跟瞄误差较大, 因此没有得高分; 3 号导弹射手动作准确、快速而且跟瞄误差也很小, 因此得了高分。从上述评分过程以及评分结果可以看出, 本文提出的成绩评定方法能够客观合理地对导弹射手的训练情况进行综合评定。

在上述评分过程中, 若采信 2 号专家计算的评价指标权重进行评分, 则 3 位导弹射手的综合得分为:

$$G_1 = 63, \quad G_2 = 60, \quad G_3 = 96$$

从上述得分可以看出, 没有命中目标的 1 号射手的评分, 高于命中了目标的 2 号导弹射手的评分, 这显然是不合理的。究其成因是 2 号专家的主观片面性导致其对关键动作的评价权重设置过低所致。

此外, 本文提出的成绩评定方法还能够根据不同的训练科目设置不同的评价标准, 比如可以将同一训练科目以往训练过程中出现的最佳成绩, 设置成该训练科目的“优”等, 这样就使得不同难度的训练科目具有不同的评价标准, 同时也使得同一训练科目, 随着训练的深入得高分的难度也越来越大。对导弹射手而言, 这将能够很好地保持导弹射手对同一训练科目的训练热情, 降低训练的枯燥感。

4 结论

针对便携式防空导弹模拟训练成绩评定问题, 给出了一种基于灰色聚类和层次分析的训练成绩评定方法。从训练的准确性、快速性和平稳性 3 个方面建立了评价指标体系; 利用多专家层次分析法给出了各评价指标的权重, 有效避免了单个专家主观片面性的影响; 进一步采用 0-1 法和灰色聚类评估法对各评价指标进行了评分, 并综合各指标的权重得到了导弹射手的综合训练成绩。实例分析表明了本文提出的成绩评定方法的合理性。此外, 该成绩评定方法尚可对其它模拟训练系统的训练成绩评定提供很好的借鉴和指导意义, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 苏曼迪, 李雅峰, 杨宇航. 基于虚拟现实技术的便携式防空导弹训练模拟器 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 287-289.
- [2] 齐占元, 徐文旭, 张更宇. 反坦克导弹飞行模拟训练成绩评定方法 [J]. 飞行力学, 2002, 20(3): 52-54, 58.
- [3] 史连艳, 宋文渊. 便携式防空导弹训练仿真系统成绩评定方法 [J]. 计算机仿真, 2004, 22(5): 25-27.
- [4] 刘力, 柳世考, 王青歌. 空地巡航导弹模拟训练成绩评估研究 [J]. 战术导弹技术, 2004, 25(4): 20-22.

(下转第 433 页)