

doi: 10.7690/bgzdh.2019.05.001

# 基于综合赋权法的无人机飞行质量综合评价方法

王玉伟, 高 永

(海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为对飞行训练质量进行公平客观的评价, 提出一种飞行质量综合评价数学模型。依据飞行训练大纲, 研究资深飞行员经验, 建立飞行质量综合评估结构层次以及基本动作层的评价指标体系。指标权重以主客观综合赋权进行确定, 针对各子指标展开定量分析。实例结果证明: 评价结果合理, 便于对训练期间的问题进行查找, 可提升飞行员操作水平。

**关键词:** 综合赋权法; 飞行质量; 综合评价; 数学模型

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Comprehensive Evaluation Method of UAV Flight Quality Based on Comprehensive Weighting Method

Wang Yuwei, Gao Yong

(College of Aeronautical Basic, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to evaluate quality of flight training in a fair and objective manner, a mathematical model for comprehensive evaluation of flight quality is proposed. According to the flight training program, the experience of senior pilots is studied, and a comprehensive evaluation structure hierarchy for flight quality and an evaluation index system for basic movement layers are established. The index weights are determined by subjective and objective comprehensive weighting, and quantitative analysis is performed for each sub-indicator. The example result proves that the evaluation result is reasonable, which facilitates the search for problems during training and improves the pilot's operation level.

**Keywords:** comprehensive weighting method; flight quality; comprehensive evaluation; mathematical model

### 0 引言

飞行训练是确保飞行安全最关键的基础。飞行训练的效能评估是全世界飞行训练行业的难点之一。在整个训练支持技术研究领域, 飞行训练质量分析评估技术已成为研究热点<sup>[1]</sup>。传统飞行训练质量管理办法, 依靠人工对飞行训练期间出现的问题、训练质量进行评估。该分析评估方法效率低下、分析准确度不高、主观性强。

针对飞行训练质量评价, 学者们开展了大量的研究工作, 空军航空大学高文琦、钱鑫等<sup>[2-7]</sup>建立了一套飞行训练成绩评估数学模型, 制定了各个阶段评价指标, 采用飞行参数误差评定飞行成绩。系统同时还具有维护数据、成绩统计等不同功能, 整体性和操作性都很强。但是在选取指标权重的时候, 运用主观赋权法 G1 法, 专家确定指标间序关系的问题在于主观性过大。在不同阶段, 评价指标权重系数存在差异, 怎样选择合适的评价指标权重系数对于飞行质量的评价具有重要作用。在权重选择方面, 方法非常多, 目前为止, 海内外在确定指标方

面多选用主观、客观赋权法 2 种, 但这 2 种方法各有优缺点, 最理想的方法是将两者有效结合, 使得到的权重系数既能体现专家经验信息, 又能体现数据的客观信息<sup>[8-11]</sup>。对于指标权重的确定, 笔者提出一种兼顾主客观信息综合赋权法。

### 1 飞行质量综合评估结构层次

考虑到综合评估成绩是一个起落飞行架次的的成绩, 将评估模型自上而下分解成 5 个层次: 飞行任务层、飞行阶段层、飞行科目层、飞行动作层、基本动作层。其中飞行任务层主要根据无人机作为平台担负的使命任务来划分, 其对特定的飞行阶段及飞行品质有严格要求, 需要在综合评估时加大权重。如: 执行光学侦查任务的无人机, 为了保证侦察信息的精确性、图片的清晰度, 需要无人机有较好的巡航稳定性, 在保持速度和高度的同时, 还应有较好的抗干扰风能力; 所以, 进行综合评定的时候必须加大无人机稳定性评价权重。相反, 对于执行突击任务的无人机, 就需要有较好的机动性, 因此在综合评定时要增加机动飞

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-02-20

作者简介: 王玉伟(1994—), 男, 江苏人, 硕士, 助理工程师, 从事舰载机动力学与飞行安全技术研究。

行的评分权重。飞行阶段层根据飞行航迹来划分，其对特定阶段的飞行安全和操控难易度有要求。比如对飞行安全构成威胁的主要因素包括起飞和着陆等，尤其是舰载无人机。每个飞行阶段又存在多个飞行科目，构成了飞行科目层。每个飞行科目同时由数个飞行动作进行编排构成，主要包括筋斗类、盘旋类、升降转弯类以及其他不同战术动作。它们构成了飞行动作层。针对不同的飞行动作进行飞行质量评价往往不具备可比性，也无法用一套标准体系衡量所有的飞行动作。为了解决这一问题，需要

把一个飞行科目分解成具有可比性，容易建立指标体系的基本飞行动作。可知任意一个复杂动作都可以分解成平飞、上升、下滑、转弯、横滚 5 个基本动作，构成了基本动作层。图 1 为飞行质量综合评估结构层次。

由图可以看出：能否合理地评价基本动作层是整个飞行质量综合评价的关键，得出基本动作评价，再根据具体飞行要求确定各个基本动作所占权重，即可求出飞行质量综合评价。笔者以基本动作层评价展开研究。

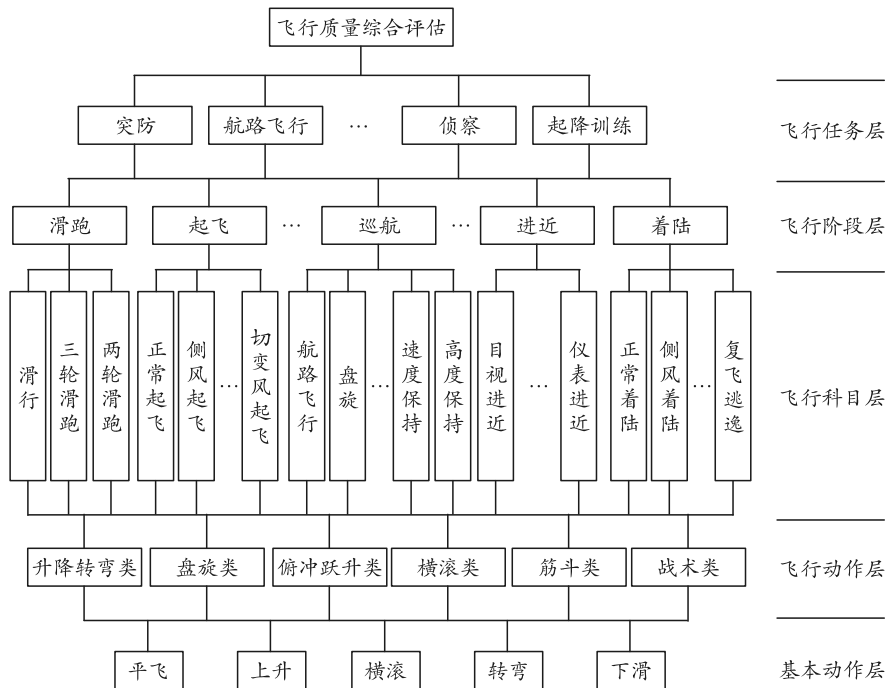


图 1 飞行质量综合评估结构层次

## 2 基本动作层评价指标体系

为确保评价指标体系的准确、实用以及科学性，在选择评价指标时遵循下述原则<sup>[3]</sup>：

1) 系统性原则：对于评价指标体系，能够对被评价问题各方面进行反映，实现对飞行质量全过程的反映。

2) 科学性原则：评价指标体系元素构成、结构都能够对飞行质量真实情况进行反映，方法、内容都合理、科学。

3) 可比性原则：对于评价对象必须能够对比、公平、可度量，不能存在明显倾向性。

4) 实用性原则：评价指标可测量、可获取的、操作简便实用。

参考上述指标选择原则，依据飞行大纲训练要求、资深的飞行员多年飞行经验，构建基本动作层

评价指标体系如表 1。

表 1 基本动作评价指标体系

基本动作层	评价指标
平飞	高度、空速、航向角、滚转角、俯仰角
上升	高度、升降率、空速、航向角、俯仰角、滚转角
下滑	高度、升降率、空速、航向角、俯仰角、滚转角
转弯	高度、空速、航向角、滚转角、
横滚	高度、空速、航向角、滚转角、俯仰角

## 3 基本动作层评价数学模型的建立

### 3.1 指标权重的确定

在主观赋权方法当中，相比于层次分析法，G1 法无需矩阵一致性判断，计算过程非常容易。在客观赋权法当中，熵权法可以充分运用原始数据提供信息，采用决策矩阵对权重进行求解，具有很好的科学性、客观性。笔者利用综合赋权法综合 G1 法和熵权法，继而飞行基本动作指标权重系数进行

确定。

### 3.2 基于博弈论的综合集成赋权法

基本思想：在不同主客观方法确定的权重之间寻找一致或妥协，即极小化可能的权重与各个基本权重之间的各自偏差。假设使用  $L$  种主客观方法对  $n$  个指标分别赋权，得到了  $L$  个指标权重向量：

$w(k)=[w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}], k=1, 2, \dots, L$ ，记  $L$  个权重向量的任意线性组合为

$$w = \sum_{k=1}^L a_k w(k), a_k > 0. \quad (1)$$

式中： $a_k$  为线性组合系数； $w$  为可能的综合赋权权重向量集合。根据博弈论思想，寻找最满意的权重向量归结为对式(1)中  $L$  个线性组合系数  $a_k$  进行优化，优化目标是使  $w$  与各个  $w_k$  的离差极小化。由此，导出对策模型如下：

$$\min \left\| \sum_{j=1}^L a_j w_j^T - w_i^T \right\|, i=1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

根据矩阵的微分性质得出式(2)的最优化 1 阶导数条件为：

$$\sum_{j=1}^L a_j w_j w_j^T = w_i w_i^T, i=1, 2, \dots, L. \quad (3)$$

由式(3)计算得出  $(a_1, a_2, \dots, a_L)$ ，然后对其进行归一化处理，即  $\alpha_k^* = a_k / \sum_{k=1}^L a_k$ ，则得到组合权重为

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w(k). \quad (4)$$

笔者采用主观法 G1 得出权重向量  $w(1)$ ，用客观熵权法得出  $w(2)$ ，组合 2 种方法确定权重，得出线性组合系数  $\alpha_1^*, \alpha_2^*$ ，求出组合权重  $w^* = \alpha_1^* w(1) + \alpha_2^* w(2)$ 。

### 3.3 G1 法原理及计算步骤

序关系分析法(G1 法)是一种主观分析法，每一步调整都可以体现专家的意愿，调整过程明确、方法简单。其优势不仅在于能够建立完全一致判断矩阵，而且确定最终序列关系时无需构造判断矩阵<sup>[7]</sup>，具体步骤如下。

#### 3.3.1 $m$ 位专家序关系一致时

1) 确定指标间序关系：依照重要程度进行排序，最重在前，次重靠后，得到一个关系序列：

$$x_1 > x_2 > \dots > x_n.$$

2)  $x_{k-1}$  和  $x_k$  之间相对重要程度的对比判断：

$$\frac{w'_{k-1}}{w'_k} = r_k, k = n, n-1, \dots, 2. \quad (5)$$

$r_k$  赋值见表 2。

表 2  $r_k$  赋值

$r_k$	说明
1.0	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 具有相同重要性
1.2	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 稍微重要
1.4	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 明显重要
1.6	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 强烈重要
1.8	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 极端重要

3) 指标权重系数计算：

$$w'_n = (1 + \sum_{k=2}^n \sum_{i=k}^n r_i)^{-1}; \quad (6)$$

$$w'_{k-1} = r_k w'_k, k = n, n-1, \dots, 2. \quad (7)$$

#### 3.3.2 $m$ 位专家序关系不一致时

假设存在  $P$  种关系序，专家人数分别为  $M^1, M^2, \dots, M^P$ ，满足  $\sum_{i=1}^P M^i = m$ 。每种关系序得到的权重指标为  $w_j^{i'} (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, n)$ 。

得到各指标权重系数为：

$$w'_j = \frac{M^1}{m} w_j^{1'} + \frac{M^2}{m} w_j^{2'} + \dots + \frac{M^P}{m} w_j^{P'}, j=1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

即 G1 主观法得出权重向量为： $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)$ ，对应式(4)中的第一种赋权法  $w(1)$ 。

### 3.4 熵权法原理及计算步骤

熵权法是一种客观赋权方法。在对权重进行确定的过程中，依据不同指标变异程度，该方法利用信息熵对不同指标熵权进行计算，之后利用熵权修改各个指标权值，所得指标权值比较客观<sup>[12-13]</sup>。

求各个指标权重具体步骤如下：

1) 对第  $i$  个目标方案中，第  $j$  个指标的评价价值比重  $p_{ij}$  进行计算：

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_i r_{ij}. \quad (9)$$

2) 计算第  $j$  个指标的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}. \quad (10)$$

其中  $k=1/\ln m$ 。

3) 计算第  $j$  个指标的熵权

$$w_j'' = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j). \quad (11)$$

即熵权法得权重向量为  $w'' = (w_1'', w_2'', \dots, w_n'')$ ，对应式(4)中的第 2 种赋权法  $w(2)$ 。

### 3.5 子指标及总指标得分方法

以基本动作层中平飞阶段为例建立评价模型。设该阶段有  $n$  个评价子指标，在各个指标参数数据采集过程中，记录了  $Z$  个数据点。利用 DTW 算法的参数距离计算，得出平飞第  $i$  个指标在第  $z$  个记录点的成绩为：

$$S_{iz} = \begin{cases} 100, & d_{iz} \leq d_{is} \\ \frac{d_{ib} - d_{iz}}{d_{ib} - d_{is}} \times 100, & d_{is} \leq d_{iz} \leq d_{ib} \\ 0, & d_{iz} \geq d_{ib} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; z = 1, 2, \dots, Z. \quad (12)$$

其中： $d_{iz}$  为评价指标  $i$  在第  $z$  个记录点的实测数据与预定航线数据的距离； $d_{is}$  为可忽略距离； $d_{ib}$  为允许存在的最大距离。

可以得到平飞第  $i$  个指标的总分为：

$$S_i = \frac{\sum_{z=1}^Z S_{iz}}{Z}, i = 1, 2, \dots, n; z = 1, 2, \dots, Z. \quad (13)$$

最后结合上述综合集成赋权法得到的各指标权重系数  $w_i^*$ ，就可以计算出在该操控手的平飞动作飞行成绩：

$$S = \sum_{i=1}^n w_i^* S_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

## 4 飞行质量评价实例

为验证评价模型的可行性，选择 4 名操控手作为评价对象，各进行平飞任务，预定平飞参数为：高度 200 m，速度 30 m/s，航向角 0°，滚转角 0°，俯仰角 5°。设置评价各子指标的可忽略距离  $d_{is}$  及允许的最大距离  $d_{ib}$ ，操控手们的指标得分如表 3。

表 3 操控手平飞成绩得分

指标	操控手 1	操控手 2	操控手 3	操控手 4
高度/m	92.5	86.2	75.4	70.2
航向角/(°)	89.3	84.7	80.2	62.6
速度/(°)	72.4	85.5	64.1	75.6
滚转角/(°)	71.6	90.2	70.4	82.7
俯仰角/(°)	80.1	92.7	68.7	86.8
综合打分	82.085	87.509	72.386	74.525

G1 法计算权重向量为： $w(1)=(0.31, 0.26, 0.19, 0.13, 0.11)$ ，熵值法计算权重向量为： $w(2)=(0.21, 0.15, 0.18, 0.29, 0.17)$ 。可以看出，专家序关系法得

到的权值最大的是高度和航向角这 2 个参数，而熵值法得到权值最大的是高度和滚转角，2 种方法所得到的权重大小排序存在差异。

将  $w(1), w(2)$  代入式(3)、式(4)得到：

$$\alpha_1^* = 0.6462, \alpha_2^* = 0.3538.$$

将  $\alpha_1^*, \alpha_2^*, w(1), w(2)$  代入式(4)得到综合权重为：

$$w^* = (0.27, 0.22, 0.19, 0.19, 0.13).$$

代入式(14)得到各个操控手的成绩为：

$$S = (82.394 \quad 87.342 \quad 72.488 \quad 74.087).$$

教员传统打分以目测为主，得出成绩为：

$$S = (90.9 \quad 85.5 \quad 77.8 \quad 66.4).$$

教员传统打分方法通过目测分析，只能观察到飞机平飞时的高度以及航向，且不能对每个评价指标进行定量分析，质量评价结果粗糙，说服力不足。笔者提出的飞行质量评价模型对所有指标进行了定量分析，并综合主、客观赋值法的优点得出了合适的权重系数，质量评价结果合理，有说服力。

## 5 结束语

笔者针对部队飞行训练质量评估方法效率低、主观性强的问题，提出了一种基于综合赋权法的飞行质量综合评价方法。指标权重采用 G1 与熵权法综合赋权进行确定，从而使得最后的权重系数不但能够体现专家经验信息，而且能够体现数据客观信息。

实验结果显示：该模型能够克服传统评价方法主观性强这一缺点，针对各个子指标展开定量分析，评价结果公正可观，便于对训练期间的问题进行查找，提升飞行员操作水平。

下一步，将根据具体的飞行任务要求，以基本动作层为基础，调研确定每个层次中子层次的评分标准，根据建立的飞行质量综合评价数学模型编写相应软件，将需要进行评价的飞行数据输入进去，即可自动获得飞行质量评价结果。

## 参考文献：

[1] DAS S. Fleet level anomaly detection of aviation safety data[C]//Proc of 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management(PHM), 2011: 1-10.

[2] ZHANG J Y, LI X R, NI S H, Flight Scores assessment and management system[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2001, 1(2): 70-73.

[3] 高文琦, 张复春, 王立波, 等. 飞行训练成绩评估模型的建立与实现[J]. 电子设计工程, 2011, 19(24): 50-52.

I: application to in-flight coarse alignment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1006-1023.

[13] CHANG L B, LI J S, CHEN S Y. Initial alignment by attitude estimation for strapdown inertial navigation systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(3): 784-794.

[14] 赵小明, 赵帅, 郭永刚, 等. 基于强跟踪滤波的车载行进间对准[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(2): 141-144.

[15] HONG W, HAN K, LEE C, et al. Three stage in-flight alignment with covariance shaping adaptive filter for the strapdown inertial navigation system (SDINS) [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Toronto, Ontario, Canada, 2010: 355-361.

[16] 王跃刚, 杨家胜, 蔚跃, 等. 基于里程计辅助的 SINS 动基座初始对准方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(5): 1060-1063.

[17] WAHBA G. A Least squares Estimate of Spacecraft Attitude[J]. SIAM Review, 1965, 7(3): 409-411.

[18] SHUSTER M D, OH S D. Three-axis Attitude Determination From Vector Observations[J]. Guidance and Control, 1981, 4(1): 70-77.

[19] WU M, WU Y, HU X, et al. Optimization-Based Alignment for Inertial Navigation Systems: Theory and algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15(1): 1-17.

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)

[4] 钱鑫, 蔡忠春. 军用飞机飞行员操纵品质评估数学模型[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8): 16-18.

[5] 刘莉雯, 张天伟, 茹斌. 多参数融合的飞行品质评估模型的建立[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(6): 1263-1265.

[6] 倪世宏, 史忠科, 王彦鸿, 等. 军用战机驾驶员操纵品质评估系统研究[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5(6): 7-10.

[7] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 121-139.

[8] 王明涛. 多指标综合评价中权系数确定的一种综合分解方法[J]. 系统工程, 1999, 17(2): 56-61.

[9] 王书吉, 姚兰, 李飞, 等. 综合赋权法在灌水区改造评价中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(4): 614-616.

[10] 宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报, 2015, 45(4): 1-8.

[11] 邓宝. 基于组合赋权法的指标权重确定方法研究与应用[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(1): 12-16.

[12] XU Z S. Study on method of combination weighting[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(2): 84-87.

[13] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 2(7): 456-459.