

doi: 10.7690/bgzd.2014.08.005

## 军用飞机飞行员操纵品质评估数学模型

钱鑫, 蔡忠春

(空军航空大学飞行器与动力系, 长春 130022)

**摘要:** 针对当前定性评估方法存在费时、费力, 评估难以公正、客观等问题, 提出一种军用飞机飞行员操纵品质评估数学模型。分析飞行员操纵品质评估对其数据的要求, 根据部队实际情况结合专家经验法选取了飞行科目。采用 G1 法进行权重的选取, 建立操纵品质评估指标体系, 对所选指标体系的分数进行分配, 并给出各项子指标的具体评分方法。结果表明: 该模型能解决模糊评价法等级评定繁琐性等缺陷, 具有成绩直观、对飞行教官要求较低、易于操作等优点, 可以适用于飞行部队正常的飞行操作品质评估。

**关键词:** 操纵品质; 数学模型; 飞行数据; 成绩评定

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## A Mathematical Model for Evaluating Pilot Controlling Quality of Military Aircraft Pilot Controlling

Qian Xin, Cai Zhongchun

(Department of Aviation Mechanical Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** At present, the qualitative assessment needs much manpower and time, but is difficult to assessment fairly and objectively. The mathematical model of military pilot handling quality evaluation is put forward. Data requirement on pilot handling quality evaluation is analyzed. Combined with actual situation, the flight course is chose based on the expert experience. Then the evaluation index system of handling qualities is established according to modified G1 method. The distribution of marks to each index and the rating method are given in detail. The results show that the model can overcome rating trivial defect of fuzzy evaluation method. It has advantages visual score, low requirements for pilot teacher, easy handling which meet the requirements of pilot handling quality evaluation of air force.

**Keywords:** handling quality; mathematical model; flight data; grade assessing

### 0 引言

操纵品质的评估是飞行训练的重要组成部分, 目的是找出飞行员自身存在的问题进行改进, 使飞行员更好地了解装备的性能, 能更加科学合理地使用装备, 从而发挥武器装备的最大效能。评估的准确性与时效性将直接影响到部队飞行训练水平的提高以及战斗力的生成。

当前, 操纵品质评估的主要方法是以人为主的定性评估。教员在日常训练或考核中跟机飞行进行实时评估, 不仅费时、费力, 而且评估过程中考核人员的水平、爱好和情绪会很大程度上影响操纵品质的评估, 这使得评估结果缺少说服力, 影响飞行员飞行能力的提高, 严重制约着部队战斗力生成; 因此, 笔者建立一个比较科学合理的操纵品质评估数学模型, 根据模型编写相应的软件, 输入实际的飞行数据, 便可得到评估结果, 这样既解决了操纵品质评估的准确性问题, 也利于飞行部队的自评。

### 1 操纵品质评估可行性分析

民航针对不同型号的飞机制定了相应的飞行品质监控标准, 监控的项目包括起飞离地、航线飞行直至最后的下滑着陆, 涉及飞行过程的方方面面。根据与标准数据偏差的大小将其分为轻度超限和严重超限。用到的飞行参数主要为高度、空速、航向角、过载和升降率。由于其数据源于计算机总线, 误差在信号源做了相应的处理之后才导入飞机内部装有的快速存储记录器(quick access recorder)进行记录, 其精度可以满足飞行品质监控要求。

对部队而言, 操纵品质评估与民航飞行品质监控大体相同, 但评估利用的参数由飞行数据记录器(flight data recorder)提供, 这就对其精度有了较高的要求。评估对记录精度最低要求为: 高度 70 m, 速度 30 km/h, 姿态角和航向角 6°, 升降率 3 m/s; 而当前军用飞机记录精度为: 高度 8 m, 速度 1 km/h, 姿态角和航向角 2°, 升降率 2 m/s。所以可

收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-03-18

作者简介: 钱鑫(1990—), 男, 硕士, 从事飞行器与动力研究。

以实现军用飞行员操纵品质的评估。

## 2 飞行员操纵品质评估指标体系

### 2.1 评估科目的确立

飞行部队对飞行员操纵品质评估比民航对此项评估更加严格。民航主要培养飞行员起飞滑跑以及着陆时的操纵品质，对于空中飞行巡航段大部分设定为自动巡航，其评估的项目较少；而军用飞机为保证其在执行任务时有较高的生存率，不仅对起飞滑跑以及着陆有较高要求，对空中飞行阶段的操纵品质要求也非常严格。

根据部队实际情况以及部分特级飞行员意见，结合飞行大纲规定，进行飞行员操纵品质评估科目的选取。对于所选科目不仅要具有代表性，而且还要具有多样性的特点，避免飞行员存在侥幸心理。选定的基本驾驶技术以及战术动作包括起飞滑跑、爬升、不同坡度水平盘旋、不同速率的下降转弯、不同类型的横滚、斤斗、降落和进场着陆。

### 2.2 操纵品质评估指标体系

指标的选取是评估过程中关键的一环，选取的

好坏将直接影响评估结果。有的指标虽然重要，但如果每个对象关于该指标的取值都差不多，那么这个指标并不能起到什么实质性的作用<sup>[1]</sup>。因此要进行科学合理的指标选取就要遵循以下原则<sup>[2-3]</sup>：

1) 易量化原则：所选取的指标应当符合实际并且简明扼要、便于测量。

2) 系统性原则：选取的指标应当反映飞行训练的全过程，不能以偏概全。

3) 科学性原则：被选取的指标无论是部分还是整体都应当科学合理，可反映真实的飞行训练过程。

4) 对比性原则：评价指标应当是可比较的、公正的，不能带有倾向性。

虽然过程决定结果，但结果不能全部反映飞行员操纵品质。有时虽然飞行人员出色完成任务，但其未必有良好的操纵品质。为了使评估更加准确，评估的指标主要在飞行科目中进行选取。

依据以上选取指标的原则及飞行专家意见，建立飞行员操纵品质评估指标体系，如表1<sup>[4-6]</sup>所示。

表1 飞行员操纵品质评估指标体系

总指标	分指标	子指标
操纵品质	起飞滑翔	离地速度( $y_6$ )、离地迎角( $y_7$ )
	爬升	俯仰角( $y_1$ )、滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、升降率( $y_4$ )、收放起落架( $y_5$ )、收放襟翼( $y_{14}$ )
	定坡度水平盘旋	滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、空速( $y_8$ )、高度( $y_9$ )
	定速率下降转弯	俯仰角( $y_1$ )、滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、升降率( $y_4$ )、空速( $y_8$ )、高度( $y_9$ )
	横滚	俯仰角( $y_1$ )、滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、空速( $y_8$ )、高度( $y_9$ )
	斤斗	俯仰角( $y_1$ )、滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、空速( $y_8$ )、高度( $y_9$ )
	降落	俯仰角( $y_1$ )、滚转角( $y_2$ )、航向角( $y_3$ )、升降率( $y_4$ )、收放起落架( $y_5$ )、收放襟翼( $y_{14}$ )
	进场着陆	接地速度( $y_{10}$ )、着陆迎角( $y_{11}$ )
	应急事件	反应时间( $y_{12}$ )、处理方法( $y_{13}$ )

## 3 飞行员操纵品质评估数学模型

### 3.1 指标权重的确定

由于各科目难度及参数重要程度的不同，应对每个科目及其对应的参数权重合理分配。对于权重的选取，目前常用的方法是美国匹兹堡大学提出的层次分析法<sup>[7]</sup>，该方法融合了定性与定量的分析，但在实际操作过程中所建立的对比矩阵不一定满足一致性，需要反复的建立一致性矩阵。对于指标较多的模型，计算量会成倍增长。因此笔者采用改进型的序关系分析法(G1-法)进行权重的分配<sup>[1]</sup>。该方法可分为3个步骤：

1) 序关系的确定  $x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_m$ 。

让专家对  $m$  个指标  $x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_m$  进行重要性排序，其中最重要的指标为  $x_1$ ，次要指标为  $x_2$ ，依次类推，则可得到一个关系式，记为

$$x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_m。$$

为减弱人为因素的干扰，指标权重的确定要由多个专家共同完成，以便评估结果科学合理。但专家的观点不同可能会导致指标重要性排序的不同。在  $n$  位专家中可能给出  $p$  ( $1 \leq p \leq n$ ) 种不同的重要性排序，把相同排序的专家分组并记为  $n_k$  ( $1 \leq k \leq n$ )， $k$  表示此种排序包含的专家个数，若有包含相同专家的情况则用  $n_k^l$  ( $l$  为 1, 2, 3 顺序取值，若没有相同组则取值为 1) 将其区分，则对于不同小组专家排序的关系式可改写为  $x_1^{n_k^l} > x_2^{n_k^l} > x_3^{n_k^l} > \dots > x_j^{n_k^l}$ 。

2) 重要程度的比较判断。

专家对于指标都应有自己的比较判断，可以给出指标  $x_{j-1}$  与  $x_j$  比较后的理性赋值  $r_{ij}^{n_k^l}$  ( $i$  表示在  $n_k^l$

组中几位专家做出的比较判断), 可用下式表示:

$$\frac{\omega_{r(j-1)}^{n_k}}{\omega_{ij}^{n_k}} = r_{ij}^{n_k} \quad (j = 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

其中  $\omega_{ij}^{n_k}$  为此位专家给出的条件所求得的关于  $j$  指标的权重系数。对于  $r_{ij}^{n_k}$  的赋值可参照表 2。

表 2  $r_j$  赋值参照

$r_j$	说明
1.0	指标 $\omega_{j-1}$ 与指标 $\omega_j$ 同等重要
1.2	指标 $\omega_{j-1}$ 比指标 $\omega_j$ 稍微重要
1.4	指标 $\omega_{j-1}$ 比指标 $\omega_j$ 明显重要
1.6	指标 $\omega_{j-1}$ 比指标 $\omega_j$ 非常重要
1.8	指标 $\omega_{j-1}$ 比指标 $\omega_j$ 极端重要

### 3) 权重系数 $\omega_k$ 的计算。

由式 (2) 结合式 (1) 联立方程组可得出  $\omega_{i1}^{n_k}, \omega_{i2}^{n_k}, \dots, \omega_{im}^{n_k}$ 。

$$\omega_{ij}^{n_k} = \left( 1 + \sum_{a=2}^j \prod_{b=1}^a r_b \right)^{-1} \quad (2)$$

再根据用几何平均值法求得每组几位专家综合后的每个参数权重, 由下式可得

$$\omega_j^{n_k} = \left( \prod_{b=1}^k \omega_{bj}^{n_k} \right)^{1/k} \quad (3)$$

最后把每组对应参数权重系数归一化求得参数权重, 如下式:

$$\omega_j = k_1 \omega_j^{(1)} + k_2 \omega_j^{(2)} + \dots + k_c \omega_j^{(c)} \quad (4)$$

其中  $k_1, k_2, \dots, k_c$  代表各分组中对应的专家人数与总专家人数之比, 即  $k/n$ ,  $\omega_j^{(1)}, \omega_j^{(2)}, \dots, \omega_j^{(c)}$  代表对应分组中求得的该参数权重。

## 3.2 子指标的评分方法

根据表 1 子指标的不同将其分为 4 类分别评分。

1) 取值适中的指标 ( $y_1, y_2, y_3, y_4, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}, y_{11}$ )。

对此类指标, 首先根据飞行手册设定 1 个标准范围 ( $Z_1, Z_2$ )、可接受的最小值  $Z_s$ 、可接受的最大值  $Z_b$ , 如图 1 所示。

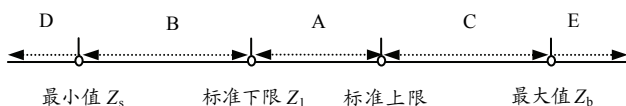


图 1 区间划分

再对指标进行评分, 该次训练在这些指标中的得分由式 (5) 可得, 设实际的飞行数据为  $m$ 。

$$y_j = \begin{cases} ((m - Z_s) / (Z_1 - Z_s) \times 60 + 40) \times \omega_j & Z_s < m \leq Z_1 \\ ((Z_b - m) / (Z_b - Z_2) \times 60 + 40) \times \omega_j & Z_2 < m \leq Z_b \\ \text{不及格} & m \leq Z_s, m \geq Z_b \end{cases} \quad (5)$$

当记录飞行参数落在 A 区间时记为满分, 落在 B、C 区间则分数按线性递减, 落在最小值与最大值边界上, 那么飞行员的操纵很可能引起飞行事故或症候记为不及格, 以此为分界线。

### 2) 取值确定的指标 ( $y_5, y_{14}$ )。

此类指标只有满分与不及格之分, 根据飞行手册设定收放起落架及襟翼的最大最小速度、高度标准, 在此标准内即为满分, 反之不及格, 如下式:

$$y_i = \begin{cases} 100 \times \omega_j & m \text{ 在标准范围之内} \\ \text{不及格} & m \text{ 不在标准范围之内} \end{cases} \quad (6)$$

### 3) 离散型指标 ( $y_{13}$ )。

此类评估考察飞行员在遇到突发情况是否能处理得当, 可以反映出飞行员对飞机性能的了解程度, 按处理结果进行评分, 如下式:

$$y_i = \begin{cases} \omega_j & m \text{ 对应“优”} \\ 0.85 \times \omega_j & m \text{ 对应“良”} \\ 0.75 \times \omega_j & m \text{ 对应“中”} \\ 0.6 \times \omega_j & m \text{ 对应“及格”} \\ \text{不及格} & m \text{ 对应“不及格”} \end{cases} \quad (7)$$

由于应急情况发生率低, 并且形式多样, 对应的评级需要多名飞行专家共同商讨进行评定。

### 4) 成本型指标 ( $y_{12}$ )。

此类指标要求越小越好, 可以反映飞行员操纵过程中反应灵敏度。根据飞行员生理要求及飞行手册制定一个理想的最小值  $Z_s$  以及最大的可接受值  $Z_b$ , 评分方法如下式:

$$y_i = \begin{cases} \omega_j & m \leq Z_s \\ ((Z_b - m) / (Z_b - Z_s) \times 60 + 40) \times \omega_j & Z_s < m < Z_b \\ \text{不及格} & m \geq Z_b \end{cases} \quad (8)$$

## 3.3 成绩的计算

由 3.1 节所示方法可以求得各子指标的得分<sup>[8]</sup>, 分指标成绩  $C$  则可由下式得

$$C_i = \{ C_i = \sum_{j=1}^p y_j \mid y_i \neq \text{不及格} \} \quad (9)$$

其中  $p$  为所评项目包含参数的个数。

若求和的过程中有不及格的得分, 则此科目记为不及格, 由下式得

$$C_i = \{C_i = 0 | y_i = \text{不及格}\} \quad (10)$$

式中： $i$ 为此项动作； $j$ 为动作中包含的指标个数对于飞行操纵品质的总成绩，同理可由式(9)、(10)求得。

最后，根据实际得分情况给出评语及改进意见。

#### 4 结束语

该模型采用了改进型的G1方法进行权重的选取，避免建立一致性矩阵，减少了计算工作量，并且具有成绩直观、对飞行教官要求较低、易于操作等优点，有效地解决了模糊评价模型对于评价等级确定时的随意性及评价等级的繁琐性等缺陷。

经初步试验证明，该模型可以适用于飞行部队正常的飞行操作品质评估。对于评估时的飞行科目只需根据实际情况进行选择，分配相应权重后即可得出成绩。对于突发事件，需要相关专家给出处理意见后进行评分。对于实际评分的计算过程经简单

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)

$$r_{FA} = \frac{N_{FA}}{N_F + N_{FA}} \times 100\% \quad (14)$$

式中： $N_{FA}$ 表示虚警次数； $N_F$ 表示真实故障指示次数。

8) 平均管理和保障延误时间( $\bar{T}_{MLD}$ )。

在导弹装备规定的统计区间内，因行政管理上的原因以及因等待备件、维修人员与运输等所延误的平均时间。其构成要素包括平均等待外界帮助不能工作的时间(MDTOA)、平均供应反应时间(MSRT)、平均申请反应时间(MRRT)、平均为获取文件而不能工作的时间(MDTD)、平均因训练问题而不能工作的时间(MDTT)、平均行政管理等其他原因而不能工作时间(MDTDS)。其度量模型为：

$$\bar{T}_{MLD} = MDTOA + MSRT + MRRT + MDTD + MDTT + MDTDS \quad (15)$$

9) 保障资源利用率( $r_{BZL}$ )。

导弹的备件、训练资料、训练器材、训练设施、保障设备、技术资料、计算机保障资源、保障设施、包装储运资源等的利用率均用下面的公式度量：

$$r_{BZL} = \frac{N_{BZO}}{N_{BZT}} \times 100\% \quad (16)$$

式中： $N_{BZO}$ 表示保障资源使用数； $N_{BZT}$ 表示保障资源总数。

10) 保障资源满足率( $r_{BZM}$ )。

导弹的备件、训练资料、训练器材、训练设施、保障设备、技术资料、计算机保障资源、保障设施、

的编程即可完成。

#### 参考文献：

- [1] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 41-55.
- [2] 张建业, 李学仁, 倪世宏. 飞行成绩评定及管理系统[J]. 空军工程大学学报, 2001, 2(1): 70-73.
- [3] 冷画屏, 刘永辉. 舰艇战术训练成绩评估数学模型[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1438-1440.
- [4] Martin S. Flight attitude track reconstruction using ywo AHRS units under laboratory conditions[C]//2009 IEEE Sensors Conference. Christchurch Sipos, M, 2009: 675-678.
- [5] 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, 9(24): 50-52.
- [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] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 60-102.
- [8] 刘炯明. 数据融合及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 35-78.

包装储运资源等的满足率均用下面的公式度量：

$$r_{BZM} = \frac{N_{BZKL}}{N_{BZXX}} \times 100\% \quad (17)$$

式中： $N_{BZKL}$ 表示保障资源可以使用数； $N_{BZXX}$ 表示保障资源需求总数。

#### 4 结束语

在对现役导弹装备使用方式及任务剖面分析研究的基础上，笔者对导弹装备战备完好性参数进行了选择，结合现役导弹装备保障实际工作，对影响现役导弹装备战备完好性的影响因素进行了分析，最终确定了影响导弹装备完好性的主要影响因素及导弹装备战备完好性度量参数及模型，可为后续开展导弹装备战备完好性评估提供技术支撑。

#### 参考文献：

- [1] 李刚, 陈国通, 蔡金燕, 等. 电子装备战备完好性预测模型研究[J]. 现代电子技术, 2002(8): 62-64.
- [2] 刘冰, 朱小东, 王小魏. 装备战备完好性的模型预测研究[J]. 兵工自动化, 2005, 24(3): 8-9.
- [3] 李院生, 时和平. 装备战备完好性及其影响因素分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(1): 38-41.
- [4] 程文鑫, 陈立强, 龚沈光, 等. 基于蒙特卡洛法的舰船装备完好性仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(6): 1090-1094.
- [5] 魏勇, 徐廷学. 基于任务的舰炮装备战备完好性建模与仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 25(12): 15-18.
- [6] 毛炳祥, 白桦, 程文鑫. 系统战备完好性分析、计算与检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 6-10.