2010年 11月 北京航空航天大学学报 November 2010
第36卷 第11期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 36 No. 11

大型客机飞行员操作程序综合评价

王黎静 郭奋飞 何雪丽 向 维

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：机组对飞机的成功操作很大程度上依赖于一套精心编制的飞行员操作程序，不合理或不合逻辑的操作程序可能导致飞行员的违规操作，进而引发飞行事故.参考波音737NG飞行机组操作手册，分析进近和着陆阶段的任务功能流程后确定了评价指标体系的层次结构；采用德尔菲法对现役飞行员进行两轮咨询，建立了基于安全性的进近和着陆阶段飞行员操作程序综合评价指标体系；对飞行员进行咨询，采用序关系分析法确定了各指标的权重系数；应用模糊综合评价法对飞行员操作程序进行综合评价，得到了飞行员操作程序的评价等级和评价值.提出了一种将功能流程图法、德尔菲法、序关系分析法和模糊综合评价法相结合的飞行员操作程序综合评价方法，并应用于波音737NG飞机进近和着陆阶段的操作程序评价.评价结果说明了该综合评价方法的合理性.

关 键 词：飞行员操作程序；进近和着陆；评价指标；权重系数；模糊综合评价

中图分类号：R 857.11

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1266-05

Comprehensive evaluation of pilot operation procedures for commercial airliner

Wang Lijing Guo Fenfei He Xueli Xiang Wei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Mostly by an elaborate set of pilot operation procedures(POP) crew can control planes successfully. Pilot may operate wrong under the inconsistent or illogical procedures, which can cause accident in flight. Normal procedures of approach and landing phases which come from flight crew operations manual of the Boeing 737NG airplane were divided into task function flow, then the hierarchy of index system was confirmed. The comprehensive evaluation index system of POP in approach and landing phases was established by consulting in-service pilots with Delphi method twice. Index weight factors were calculated by order relation analysis. POP was evaluated by fuzzy comprehensive evaluation and evaluation scales and values were calculated by weight factors and evaluation matrixes. A POP comprehensive evaluation method was proposed with the integration of functional flow diagram, Delphi, order relation analysis and fuzzy comprehensive evaluation. The method was used in evaluation of Boeing 737NG airplane POP of approach and landing phases. The result indicate the validity and rationality of the comprehensive evaluation method.

Key words: pilot operation procedures; approach and landing; evaluation index; weight factor; fuzzy comprehensive evaluation

飞行员操作程序(POP, Pilot Operation Procedures)是在环境-飞机-飞行员大系统中，从人机界面，即显示界面-飞行员-控制界面去描述、说明航空电子系统功能、飞行员操作与飞机状态、环境

收稿日期：2010-07-01

基金项目：国家973基金资助项目(2010CB734103)

作者简介：王黎静(1965—)，女，山东郓城人，副教授，wanglijing@buaa.edu.cn.

关系的技术文件. 飞行员操作程序关系到飞行员如何操作才能使整个航空电子系统甚至全机进入飞行员所需的最佳状态,使飞行员快捷、简便、有效地完成任务[1]. 在民用航空领域 POP 也称作 Flight Operation,它是 FCOM(Flight Crew Operation Manual)的重要组成部分,是航空承运人编制标准操作程序(SOPs, Standard Operating Procedures)的基础参考文件. POP 作为标准操作程序编制的基础文档是影响标准操作程序质量的重要因素,有资料表明只有在清楚、易理解、适于飞行员操作的 POP 基础上才有可能编制出清楚、易理解、适用于机组的标准操作程序[2].

下面的研究很好地说明了标准操作程序与飞行安全的关系. 1994 年,美国国家运输安全委员会通过对 37 起飞行事故研究表明:操作程序失误占整个机组失误的 24%,它是导致事故的最主要因素[3]. 1987 年,文献[4]分析了 1977 年至 1984 年间的 93 起喷气式运输飞机坠机事故,发现导致事故的最主要因素是"飞行员背离基本操作程序",占到整个机组失误的 33%. 两项研究的结论都表明标准操作程序是影响飞行安全的重要因素之一,而只有通过分析评估并完善标准操作程序才能减少由其引起的飞行操作失误,从而减少飞行安全事故的发生.

本文以波音 737NG 飞机为例,在对其进近着陆阶段的飞行员操作程序进行分析,通过德尔菲法对飞行员进行咨询,从而建立飞行员操作程序综合评价指标体系,用序关系分析法确定了各指标的权重系数,最后应用模糊综合评价对飞行员操作程序进行了综合评价.

1　综合评价指标体系

指标体系是指由一系列指标构成的整体,它能全面真实地综合反映飞行员操作程序各个方面的情况,不仅是进行有效综合评价的前提,也是权重系数确定的依据.

1.1　进近着陆阶段综合评价指标体系模型

进近和着陆是非常关键的飞行阶段,国际飞行安全基金会记录在案的飞行事故中有 56.2% 是发生在进近和着陆阶段. 因此,考虑到机组标准操作程序内容极其庞杂,本文选取进近和着陆阶段的正常操作程序为研究对象,对飞行员操作程序进行综合评价研究.

首先参考波音 737NG 飞行机组操作手册,将进近和着陆阶段作为一个整体目标来研究,根据实际飞行中的具体着陆情况,与飞行员讨论后,将其详细划分为以下 8 个阶段,说明各阶段流程关系的功能流程图如图 1 所示. 其中,精密仪表进近和非精密仪表进近为两种可选的仪表进近方式,精密仪表进近指使用仪表着陆系统(ILS, Instrument Landing System)的进近,非精密仪表进近指使用垂直导航(VNAV, Vertical Navigation)的进近. 此外,复飞也是进近和着陆过程中一个可选择的阶段,且十分重要.

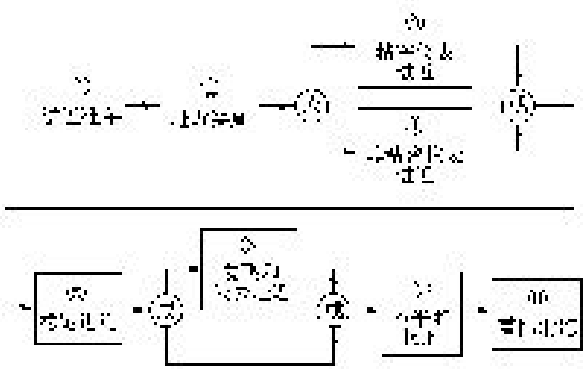

图 1　进近和着陆阶段功能流程图

依据综合评价指标体系的建立原则,通过对波音 737NG 现有的飞行员操作程序和相关文献进行研究和分析,并征求波音 737NG 机型现役飞行员的意见,确定出一个如表 1 所示的四层次评价指标体系模型. 指标集中的评价指标多达 68 个,由于篇幅有限就不一一列出.

表 1　飞行员操作程序综合评价指标体系模型

总目标层	子目标层	子子目标层	指标集
O: 飞行员操作程序综合评价指标体系	O_1:进近阶段	O_{11}:进近准备	U_1
		O_{12}:进近实施	U_2
		O_{13}:精密仪表进近	U_3
		O_{14}:非精密仪表进近	U_4
		O_{15}:稳定进近	U_5
	O_2:复飞阶段	O_{21}:复飞和失去进近	U_6
	O_3:着陆阶段	O_{31}:拉平和接地	U_7
		O_{32}:着陆滑跑	U_8

注:O表示评价总目标,O_i($i=1,2,3$) 表示评价子目标;O_{ii}表示评价子子目标;U_k表示评价指标集.

1.2　德尔菲法筛选指标

项目实施过程中,采用德尔菲法进行专家咨询,以确定 POP 的综合评价指标. 接受咨询的专家都来自某航空公司波音 737NG 机队的现役飞行员. 在第 1 轮咨询中,首先介绍了飞行员操作程序的研究目的及相关背景资料,供咨询专家参考. 然后,要求每位专家根据已有的知识和经验判断出每个指标对飞行安全的影响程度. 影响程度等级的划分采用 5 点 Likert 型标度,1～5 表示的影响程度等级分别为"不大"、"一般"、"大"、"很大"和"极大". 同时,又要求专家给出在判断各指标对

飞行安全的影响程度等级时的自信度.自信度等级的划分采用5点标度,1～5表示的自信度等级分别为“很低”、“低”、“一般”、“高”和“很高”.当专家组的自信度等级(GCR,Group Confidence Ranking),即所有专家给出的自信度等级的均值,不小于3时,表示咨询结果比较接近于主观判断的真实情况.第2轮咨询增加了多数专家的反馈意见.对于改进德尔菲法,一般通过两轮咨询,专家的意见已基本趋于一致.因此,依据第2轮咨询形成的专家一致意见,筛选出评价指标体系.本文把专家一致意见定义为:不少于2/3(或67%)的专家判断等级为“很大”以上的判断结果,即Likert量表等级大于等于4[5].当然,筛选指标的前提是该指标的自信度等级的均值大于3.

第1轮咨询后,从初步确定的68个指标中筛选出了63个指标.筛除的5个指标中,有3个为指标专家一致意见的判断等级为“大”,不满足大于等于4的条件;另外2个指标是根据咨询过程中多名飞行员反映指标不合理而筛除.第2轮咨询后,所有指标的专家一致意见判断等级都满足条件.

1.3 评价指标咨询结果统计分析

为了保证问卷具有较高的可靠性和有效性,在形成正式问卷之前,应当对问卷进行试测,并对试测结果进行信度分析,根据分析结果筛选问卷题项,调整问卷结构,从而提高问卷的信度.一般用信度系数来评估问卷一致性程度,信度系数越大,一致性程度越高,表明测量的可信程度也越高.

本文采用目前最常用的克伦巴赫 α 信度系数法对第一次问卷调查的结果进行了信度分析.利用统计软件SPSS进行分析计算,初选的68个指标的克伦巴赫 α 信度系数值为0.964,量表的内在一致性程度非常高,说明量表的信度非常可靠,不需要进行调整.

对于飞行员操作程序评价指标的专家咨询结果,本研究采用以下几个统计参数进行频数统计处理和分析:①集中程度,用数值平均数和位置平均数来描述;②离散程度,用标准差 σ_i 描述,它反映专家对第 i 个指标影响飞行安全程度评价的分散程度,该值越小,表明专家评价结果的分散程度越小;③协调程度,用协调系数W表征.

根据两轮咨询结果分别计算出协调系数如表2所示.

表2 协调系数非参数检验

检验参数	第1轮		第2轮
	筛除指标前	筛除指标后	
N	24	24	24
W_K	0.146	0.150	0.341
d	67	62	62
p	0.000	0.000	0.000

注:N表示样本数;W_K 表示肯德尔协调系数;d 表示自由度;p 表示概率值.

通过分析表2中的数据可得出以结论:

1)两轮咨询结果的概率 p 都小于显著性水平0.001,则应拒绝原假设,说明专家评价的协调程度是可信的,咨询结果可取.

2)对两轮咨询而言,由于第2轮咨询中给出了第1轮多数专家的反馈信息,因此,第2轮咨询结果的协调系数明显大于第1轮,说明专家对整个评价指标体系的判断结果更加协调,经过筛选后确立的指标体系更具有代表性.

2 指标权重系数确定

本文采用序关系分析法进行权重系数计算,其基本思想是:先对各评价指标按某种评价准则进行定性排序,再按一定标度对相邻指标间依次比较判断,进行定量赋值,并对判断结果进行数学处理,得出各个评价指标的权重系数[6].

2.1 权重系数咨询

本文对建立的指标体系中的一级指标和二级指标进行了权重系数的专家咨询.接受指标权重系数咨询的专家都来自某航空公司波音737NG机队的现役飞行员,且都在飞波音737NG系列的机型.本次权重系数调查共送出25份调查表,收回24份有效问卷.应用序关系分析法迭代计算各指标的权重系数.飞行员操作程序一级指标权重系数的计算结果如表3所示.

表3 指标集权重系数

指标集	权重系数
$\{w_{U_1}, w_{U_2}, w_{U_3}, w_{U_4}, w_{U_5}, w_{U_6}, w_{U_7}, w_{U_8},\}$	{0.14,0.14,0.11,0.10, 0.16, 0.12,0.13,0.10}

2.2 权重系数统计分析

对不同专家人数下的8个一级指标$\{w_{U_1}, w_{U_2}, w_{U_3}, w_{U_4}, w_{U_5}, w_{U_6}, w_{U_7}, w_{U_8}\}$权重系数统计如图2所示.通过分析图2可以得出以下两点结论:①随着专家人数的逐渐增加,权重系数趋于稳定,说明计算结果合理可信;②当专家人数达到10以上时,指标权重系数趋于平稳,说明所述“专家人数以10～30人为宜”是科学合理的.

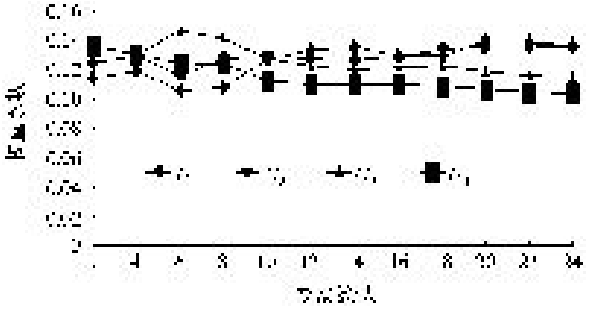

图2 不同专家人数的指标权重系数比较

3 模糊综合评价

模糊综合评价(FCE,Fuzzy Comprehensive Evaluation)方法是一种用于涉及模糊因素的对象系统的综合评价法.在研究复杂系统中所遇到的问题时,不仅涉及多方面的客观因素,还涉及人

的问题.因此,研究过程中就必然不能忽视客观外界事物在人脑中反映的模糊性及事物本身的模糊性.所谓模糊评价,就是根据给出的评价标准和实测值,经过模糊变换后对事物做出评价,它是在模糊集合理论基础上形成的一种综合评价方法.

3.1　模糊综合评价应用

本文对飞行员操作程序进行模糊综合评价调查,将飞行员操作程序中影响飞行安全的评价等级划分为 5 个等级,即优秀、良好、中等、较差、极差,其含义如表 4 所示.

表 4　飞行员操作程序评价等级及其含义

评价等级	分值	评语含义
优秀	5	不存在影响飞行安全的问题
良好	4	存在可忽略不计的影响飞行安全的问题
中等	3	存在一般的影响飞行安全的问题
较差	2	存在较高的影响飞行安全的问题
极差	1	存在极高的影响飞行安全的问题

本次对飞行员进行主观调查共收回 24 份有效问卷,对咨询结果进行统计分析,计算每个指标的评价等级频数,建立了模糊评价矩阵.

3.2　模糊综合评价结果分析

本文以指标体系中的一级指标"进近准备"(U_1)为例,对其进行模糊综合评价,具体步骤如下:

1) 评价对象:U_1进近准备.评价指标集:$\mathbf{U}=\{u_{11},\ u_{12},\ u_{13},\ u_{14},\ u_{15},\ u_{16},\ u_{17},\ u_{18},\ u_{19}\}$.

2) 拟定评语级:$\mathbf{V}=\{$优秀(v_1),良好(v_2),中等(v_3),较差(v_4),极差(v_5)$\}$.

3) 指标权重系数:$\mathbf{W}=\{\omega_{U_1},\ \omega_{U_2},\ \omega_{U_3},\ \omega_{U_4},\ \omega_{U_5},\ \omega_{U_6},\ \omega_{U_7},\ \omega_{U_8}\}$.指标具体数值见表 3.

4) 模糊评价矩阵:

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} \\ r_{71} & r_{72} & r_{73} & r_{74} & r_{75} \\ r_{81} & r_{82} & r_{83} & r_{84} & r_{85} \\ r_{91} & r_{92} & r_{93} & r_{94} & r_{95} \end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix} 0.42 & 0.54 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.50 & 0.46 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.54 & 0.42 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.54 & 0.42 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.54 & 0.42 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0.54 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0.54 & 0.42 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.63 & 0.33 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.54 & 0.46 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中,r_{ij}表示第 i 个评价指标对 j 个评价等级的隶属度,它反映了各评价指标与评价等级之间用隶属度表示的模糊关系.

模糊评价矩阵的建立方法采用专家评议法,即由专家利用经验对因素集中各因素相对于其评语等级进行主观评价得到.确定评价矩阵中的元素 r_{ij}的公式为

$$r_{ij}=d_{ij}/\ d \tag{2}$$

式中,d 表示参加评价的专家人数;d_{ij}表示第 i 个评价因素做出第 j 评价等级的专家人数.

矩阵 $\boldsymbol{R}$的元素值是根据飞行员主观评价咨询结果计算得到的.

5) 模糊综合评价结果:利用权重系数和评价矩阵进行模糊复合运算可得到 $\mathbf{U}\times\mathbf{V}$ 上的模糊综合评价结果为

$$B=\boldsymbol{W}\circ\boldsymbol{R}=\{0.51,0.44,0.05,0,0\} \tag{3}$$

式中,"∘"为模糊算子.

6) 模糊综合评价等级:按模糊综合判定的最大隶属度原则

$$B=\max_{1\leqslant i\leqslant m}B_i \tag{4}$$

可得 $B_1=0.51$,该值位于评价矩阵的第 1 列,因此,判定一级指标"进近准备"的评价等级为"优秀".

7) 模糊综合评价值:

$$Y=B\circ\mathbf{V}^{\mathrm{T}}=\{0.51,0.44,0.05,0,0\}\circ(5\quad 4\quad 3\quad 2\quad 1)^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

可得 $Y=4.46$,因此,一级指标"进近准备"的评价值为 4.46.

对每个一级指标重复上述步骤,得到的模糊综合评价结果如表 5 所示.

表 5　飞行员操作程序的模糊综合评价结果

指标名称	评价结果	评价等级	评价值
U_1	{0.51,0.44,0.05,0,0}	优秀	4.46
U_2	{0.08,0.17,0.03,0,0}	优秀	4.77
U_3	{0.83,0.17,0.03,0,0}	优秀	4.79
U_4	{0.52,0.48,0,0,0}	优秀	4.64

U_5	{0.90,0.10,0,0,0}	优秀	4.90
U_6	{0.87,0.13,0,0,0}	优秀	4.87
U_7	{0.59,0.41,0,0,0}	优秀	4.59
U_8	{0,65,0.35,0,0,0}	优秀	4.65

由一级指标的评价结果可得到进近和着陆阶段飞行员操作程序这一总目标的评价矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}0.51 & 0.44 & 0.05 & 0 & 0\\ 0.80 & 0.17 & 0.03 & 0 & 0\\ 0.83 & 0.13 & 0.04 & 0 & 0\\ 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0\\ 0.90 & 0.11 & 0 & 0 & 0\\ 0.87 & 0.13 & 0 & 0 & 0\\ 0.59 & 0.41 & 0 & 0 & 0\\ 0.65 & 0.35 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix} \tag{6}$$

由式(6)和表3中的一级指标的权重系数 $\{\omega_{U_1},\omega_{U_2},\omega_{U_3},\omega_{U_4},\omega_{U_5},\omega_{U_6},\omega_{U_7},\omega_{U_8}\}$ 进行模糊运算,可得总目标的模糊综合评价结果为

$$B=\boldsymbol{W}\circ\boldsymbol{R}=\{0.72,0.27,0.01,0,0\} \tag{7}$$

可得,进近和着陆阶段飞行员操作程序模糊评价等级为"优秀",评价值 $Y=4.71$.

通过分析式(7)和表5中的模糊综合评价结果,可得到以下几点结论:

1) 从总目标的评价值可以看出,进近和着陆阶段飞行员操作程序分值较高,说明波音737NG系列飞机的操作程序整体很好.

2) 进近和着陆阶段飞行员操作程序的评价等级是优秀,结果说明波音737NG系列飞机的操作程序很好,不存在影响飞行安全的问题.

3) 从每个次级阶段即一级指标的评价值可以看出,每个阶段的分值都较高且比较集中,说明每个阶段的操作程序都很完善.

4 结束语

本文以波音737NG系列飞机的进近和着陆阶段飞行员操作程序的综合评价研究为例,提出了一种功能流程图、德尔菲法、序关系分析法和模糊综合评价法相结合的飞行员操作程序综合评价方法.该方法是以飞行阶段为基础建立的飞行员操作程序评价指标体系,而对于不同类型大型客机而言,飞行阶段的划分是相似的,因此本方法可应用于其他大型客机的飞行员操作程序综合评价.

本文对飞行员操作程序的综合评价研究主要集中于操作内容,未考虑操作过程中飞行员认知和决策对飞行安全的影响.因此,在进一步的研究中可以对飞行员操作过程中脑力负荷和情景意识等进行分析研究.

致 谢 感谢中国国际航空公司飞行总队第三大队的殷雪冬及其他飞行员!

参考文献(References)

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:航空电子系统及仪表[M]. 北京:航空工业出版社,2001
General editors of aircraft design manual. Aircraft design manual:avionics systems and instrumentation[M]. Beijing: Aviation Industry Press,2001(in Chinese)

[2] 中国民用航空总局飞行标准司. 机组标准操作程序[R]. AC-121-22,2007
Civil aviation administration of China. Standard operating procedures[R]. AC-121-22,2007(in Chinese)

[3] National transportation safety board. A Review of flightcrew-involved major accidents of US air carriers, 1978 through 1990[R]. PB94-9170011994

[4] Lautman L,Gallimore P L. Control of the crew caused accident:results of a 12-operator Survey[J]. Boeing Commercial Airplane Company Boeing Airline,1987(4/5/6):1-6

[5] Jonathan O, Sue C, Mary R. What 'ideas-about-science' should be taught in school science? A delphi study of the expert community[J]. Journal of Research in Science Teaching,2003,40(7):692-720

[6] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2007
Guo Yajun. Comprehensive evaluation theory method and application[M]. Beijing:Science Press,2007(in Chinese)

(编 辑:李 晶)