

基于改进物元可拓模型的飞机监造工作 定量评价方法

倪辰旖

(中国商飞上海飞机制造有限公司维修交付中心, 上海 201323)

摘要: 为解决飞机监造工作评估标准模糊的问题, 结合实际工作, 形成客户检查项目评估体系, 引入改进物元可拓模型建立评价模型, 对飞机监造工作进行准确定量评估。该模型以贴近度代替关联度, 将评估体系中各个客户检查项目评价指标量化, 提高评估准确性。经实例分析, 评估结果与运营人反馈信息一致, 验证其可行性。通过对监造工作的准确定量评估, 为运营人实施监造工作提供参考, 为飞机交付提供支持, 为提高制造质量提供指导。

关键词: 飞机监造; 改进物元可拓模型; 定量评价; 层次分析法

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0099-06

为确保飞机制造质量, 运营人或其授权人需在装配制造过程中实施监造, 即对飞机生产过程进行监督和检查^[1]。为规范飞机监造工作, 保证监造工作的质量, 中国民航局适航司发布了咨询通告 AC-21-AA-2010-16《民用航空器监造工作要求》(以下简称《工作要求》), 对监造工作的程序、流程和具体内容进行规定, 足见飞机监造的重要性^[2]。

为改进飞机监造工作方法, 提高监造工作的质量和效率, 国内运营人及授权人对监造工作管理方法不断探讨、研究和总结, 并建立数学模型对飞机监造工作进行评价^[3]。但目前, 飞机监造工作的评价标准仍较为模糊, 缺乏准确性和直观性, 因此, 有必要采用科学有效的定性评价方法对飞机监造工作进行评价。

物元可拓法是可拓数学和物元理论相结合的评价方法, 具有兼顾定性和定量、适用领域广、评价结果可信度高的特点^[4], 被广泛应用于建筑安全、灾害风险、投资效益等项目的评价^[5-6], 经改进后也可应用于无人作战装备、城市轻轨交通等工程领域^[7-8]。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性定量分析结合的决策方法, 将复杂系统的分析过程数学化、主观分析量化、要素差异数值化, 以保持评价过程一致性, 因而在各领域被广泛应用于确定指标的权重。乔国华等^[9]基于层次分析法结合物元可拓模型对电力变压器的监

造工作进行定量评价, 验证了基于物元可拓理论的电力变压器监造工作定量评估方法科学可行。

据此, 对飞机监造工作现有体系进行梳理, 建立客户检查项目评估体系, 使用层次分析法确认指标权重, 使用改进物元可拓理论建立评价模型, 引入架次数据进行算例分析, 利用 Matlab 软件辅助编程计算, 给出不同架次的评价等级, 验证使用改进物元可拓模型对飞机监造工作进行定量评估的可行性。

通过以上工作, 对飞机监造工作科学有效地定性评价, 提高监造工作评价的准确性, 为运营人或其授权人的监造工作提供参考, 为飞机交付提供支持。

1 飞机监造工作

飞机监造工作是指在飞机制造过程中, 由运营人或其授权人对飞机生产过程进行监督和检查, 保证飞机符合技术标准、工艺规范和设计文件要求。

1.1 监造工作主要内容

飞机制造阶段的监造工作主要包括两个方面: 一是完成事先确定好的客户检查项目, 二是根据运营人或其授权人的要求增加临时检查。结合实际情况分析两方面工作量占比, 并考虑临时检查的不确定性, 将以客户检查项目作为主体框架建立评估体系^[10]。

1.2 客户检查项目的实施流程

飞机监造工作伴随飞机制造整个过程, 以实施

收稿日期: 2023-11-23

作者简介: 倪辰旖(1993—), 女, 江苏苏州人, 硕士, 中级工程师, 研究方向为民用飞机监造和交付。

客户检查项目为主要内容,其流程主要包含四个步骤^[11]。

(1)确认客户检查项目。由运营人或授权人与制造厂签订书面文件确认需要执行的客户检查项目。

(2)执行客户检查项目。按照合同约定由飞机运营人或授权人执行客户检查项目并进行记录。

(3)处置客户检查问题。制造厂监造人员记录执行客户检查项目时发现的检查问题,组织责任部门处理并记录。

(4)关闭客户检查项目和问题。客户检查项目执行后即视为项目的关闭;运营人或授权人对检查问题处置结果进行验证,并同意问题的关闭。

1.3 客户检查项目的评价标准

在执行客户检查项目的过程中,运营人或其授权人的监造代表通常根据图纸、手册或工艺规范进行检查,对于偏离要求的零件、位置、偏离情况和程度进行记录,由制造厂商整改并答复最终结果。

根据问题数量和性质,综合考虑对生产成本及交付计划的影响,通常作为对单个客户检查项目的评价标准。

2 客户检查项目评价体系的建立

根据《工作要求》的监造必检项目,将飞机客户检查项目分为重要结构件的对接检查、重要封闭区域关闭前的检查、重要非封闭区域检查、系统测试或功能试验/展示、外部喷漆检查、客舱和设备检查 6 个部分。结合实际生产流程和监造实施需求,对客户检查项目进行细化、提取和筛选,形成 6 个一级指标和 37 个二级指标,建立如表 1 所示的客户检查项目评价体系。

3 改进物元可拓模型的建立

传统的物元可拓模型将物元表示为有序三元组 $r = (N, C, V)$, 即事物 N 具有特征 C , 其特征量为 V 。结合可拓理论,通过建立相同特征物元评价模型、确立各特征量值标准(经典域和节域)、根据各项特征的实测数值(待评物元)计算关联度和特征值,最终评价物元所属类别。然而,传统的物元可拓模型存在一定的局限和不足^[12]: ①评价指标的多元性和量纲差距可能很大,且当实测值超出节域范围时,该模型无法评价; ②从算法角度来看,关联度可以看作模糊数学中隶属度的一种,但根据最大隶属度原理,在某些情况下关联度并不能反映对象边界的模糊性,造成信息丢失和结果偏差。

表 1 客户检查项目评价体系

评价目标	一级指标	二级指标
飞机客户检查项目	重要结构件的对接检查 (B ₁)	外部前后梁对接区域(C ₁)
		外部上下翼面对接区域(C ₂)
		机翼内部对接区域(C ₃)
		机身段对接区域(C ₄)
		发动机安装(C ₅)
	重要封闭区域关闭前的检查(B ₂)	机翼前梁封闭区域(C ₆)
		机翼后梁封闭区域(C ₇)
		垂直安定面后缘区域(C ₈)
		平尾后缘区域(C ₉)
		机翼油箱封闭前(C ₁₀)
		中央翼油箱封闭前(C ₁₁)
		客舱地毯安装前(C ₁₂)
		发动机吊挂口盖封闭前(C ₁₃)
		机身整流罩区域封闭前(C ₁₄)
		前货舱隔间封闭前(C ₁₅)
		后货舱隔间封闭前(C ₁₆)
	重要非封闭区域 (B ₃)	前起落架舱(起落架)(C ₁₇)
		主起落架舱(起落架)(C ₁₈)
		APU 舱总检(C ₁₉)
		后附件舱总检(C ₂₀)
		电子设备舱总检(C ₂₁)
		前货舱总检(C ₂₂)
		后货舱总检(C ₂₃)
	系统测试或功能试验/展示 (B ₄)	登机门/服务门(C ₂₄)
		应急门(C ₂₅)
		货舱门(C ₂₆)
		电子设备舱门(C ₂₇)
		机身压力(C ₂₈)
		起落架收放系统(C ₂₉)
		飞控系统综合(C ₃₀)
		旅客广播系统(C ₃₁)
		应急撤离照明系统(C ₃₂)
		压力加油(C ₃₃)
	外部喷漆 (B ₅)	喷漆前的飞机外观(C ₃₄)
		喷漆后的飞机外观(C ₃₅)
	客舱设备 (B ₆)	客舱应急设备(C ₃₆)
		客舱和驾驶舱布局(C ₃₇)

针对以上两点,对传统物元可拓模型做出以下改善^[13]: ①将经典域和待评价物元归一处理; ②采用贴适度代替关联度计算。

3.1 构建经典域、节域和待评物元

3.1.1 经典域物元

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{1j} \\ & c_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & c_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_j 为对应第 j 个评价等级的同征物元; N_j 为物元 N 的第 j 个评价等级; C_i 为选取的第 i 个指标; V_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个评价等级的取值范围,用

(a_{ij}, b_{ij}) 表示,其中 a_{ij}, b_{ij} 为取值范围的上下界限值。

3.1.2 节域物元

$$\mathbf{R}_p = (N_p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{R}_p 为 N_p 为物元 N 的全部评价等级; V_{pi} 为第 i 个指标的全部指标取值范围,用 (a_{pi}, b_{pi}) 表示, a_{pi}, b_{pi} 为全部指标取值范围的上下界限值。

3.1.3 待评物元

$$\mathbf{R}_0 = (N_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}_0 为待评价物元; N_0 为待评物元的评价等级; V_i 为第 i 个指标的实际量值。

3.2 归一化处理

因指标量纲已统一,为便于贴近度计算,将 $\mathbf{R}_j, \mathbf{R}_p, \mathbf{R}_0$ 归一化处理,用 $\mathbf{R}'_j, \mathbf{R}'_p, \mathbf{R}'_0$ 表示。

$$\mathbf{R}'_j = (N_j, C_i, V'_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v'_{1j} \\ & c_2 & v'_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v'_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a'_{1j}, b'_{1j}) \\ & c_2 & (a'_{2j}, b'_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a'_{nj}, b'_{nj}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $a'_{ij} = a_{ij}/b_{pi}, b'_{ij} = b_{ij}/b_{pi}$ 。

$$\mathbf{R}'_p = (N_p, C_i, V'_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a'_{p1}, 1) \\ & c_2 & (a'_{p2}, 1) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a'_{pn}, 1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $a'_{pi} = a_{pi}/b_{pi}$ 。

$$\mathbf{R}'_0 = (N_0, C_i, V'_i) = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & v'_1 \\ & c_2 & v'_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v'_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $v'_i = v_i/b_{pi}$ 。

3.3 确定权重

采用层次分析法确定权重,主要包含以下四个步骤。

(1)分解问题。分析问题并分解为多个因素,梳理因素之间的隶属关系,建立层次结构模型。

(2)比较赋值。同一层次中的因素两两比较,根据本层相对于上层重要程度用 1~9 的标度值赋值。

(3)处理数据。计算最大特征根及特征向量,并计算各因素权重。各层因素权重加权计算得到每个因素的权重值。

(4)一致性检验。为保证各因素判断的协调一致,避免互相矛盾,对权重结果进行一致性检验。

3.4 计算贴近度

采用贴近度代替关联度计算:

$$D_{ij} = \left| v'_i - \frac{1}{2}(a'_{ij} + b'_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b'_{ij} - a'_{ij}) \quad (7)$$

$$K_j(N_0) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n \omega(c_i) D_{ij} \quad (8)$$

式中: D_{ij} 为物元关于指标 c_i 到经典域的距; $K_j(N_0)$ 为物元与评价等级 j 的贴近度; n 为指标 c_i 的总数; $\omega(c_i)$ 为指标 c_i 的权重; v'_i 为归一化处理后的指标 c_i 的实测值。

3.5 评价等级判定

比较贴近度大小,待评价物元的评价等级由最大贴近度判定:

$$K(N_0) = \max\{K_1(N_0), K_2(N_0), \dots, K_j(N_0)\} \quad (9)$$

$$\bar{K}_j(N_0) = \frac{K_j(N_0) - \min_{j=1,2,3,4} K_j(N_0)}{\max_{j=1,2,3,4} K_j(N_0) - \min_{j=1,2,3,4} K_j(N_0)} \quad (10)$$

则其评价等级变量特征值 j^* 为

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^4 j \bar{K}_j(N_0)}{\sum_{j=1}^4 \bar{K}_j(N_0)} \quad (11)$$

可通过 j^* 判断待评事物偏向评价等级的程度。

4 算例分析

4.1 构建经典域、节域及待评价物元

对飞机监造工作进行评价,划分为 1~5 的五个递进等级,等级 1 为最差,等级 5 为最好。为方便每个指标的分值计算,以百分制计值,即可建立经典域 \mathbf{R}_j 及节域 \mathbf{R}_p ,如表 2 所示。

表 2 经典域和节域的建立

指标	\mathbf{R}_j					\mathbf{R}_p
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	
$C_1 \sim C_{37}$	(0,60)	(60,70)	(70,80)	(80,90)	(90,100)	(0,100)

执行检查项目时所发现的检查问题可以反映监造工作的执行情况,客户检查问题根据对飞机质量和生产进度的影响可分为超差、偏离、品质、建议等不同的类别。选取四架份同型号飞机提取研究数据,综合考虑影响项目执行和检查问题提出的多种因素(如航司、检查和处置方式等),对各评价指标逐一计分,建立待评价物元 R_0 ,如表 3 所示。

4.2 确定权重

通过 AHP 法得到飞机客户检查项目各级指标

权重如表 4 所示^[13]。

4.3 贴近度计算

利用 Matlab 软件,运用归一化后的 R'_j 、 R'_p 、 R'_o 及指标权重计算贴近度及其特征值如表 5 和表 6 所示。

4.4 等级的判定和分析

结合计算结果可以判定,架次 A 为 2 级,架次 B、D 为 4 级,架次 C 为 5 级。结合 j^* 判断,架次 B 的 j^* 值为 3.646 0,架次 D 的 j^* 值为 3.828 7,则架次 B 和 D 都有倾向 3 级的趋势,B 的趋势更明显。

表 3 待评价物元的建立

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
架次 A	82	50	90	50	67	66	58	95	64	56	90	83	50
架次 B	90	90	90	90	58	75	59	87	95	74	90	93	90
架次 C	90	90	90	74	74	90	90	95	95	90	90	95	90
架次 D	90	90	90	80	90	82	50	95	79	82	67	91	60
指标	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}
架次 A	89	63	90	72	55	55	55	55	79	80	79	63	79
架次 B	83	78	74	95	95	79	57	85	95	95	95	95	95
架次 C	95	82	90	95	87	79	87	95	95	95	80	72	79
架次 D	85	82	88	95	95	72	79	87	87	95	95	95	87
指标	C_{27}	C_{28}	C_{29}	C_{30}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{36}	C_{37}		
架次 A	79	95	95	95	95	95	95	95	63	95	64		
架次 B	95	95	95	95	95	95	95	89	55	95	55		
架次 C	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	92		
架次 D	95	95	95	95	95	95	95	79	95	87	92		

表 4 各级指标权重

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
权重(w_i)	0.073	0.073	0.073	0.028	0.196	0.017	0.017	0.01	0.017	0.045	0.045	0.004	0.045
指标	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}
权重(w_i)	0.006	0.011	0.011	0.033	0.033	0.013	0.013	0.013	0.005	0.005	0.002	0.002	0.002
指标	C_{27}	C_{28}	C_{29}	C_{30}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{36}	C_{37}		
权重(w_i)	0.002	0.008	0.017	0.012	0.005	0.005	0.008	0.009	0.027	0.046	0.069		

表 5 贴近度计算结果

指标	架次 A	架次 B	架次 C	架次 D
N_1	0.729 7	0	0	0
N_2	1	0.535 2	0.400 7	0.385 7
N_3	0.913 9	0.850 9	0.783 1	0.726 0
N_4	0.575 7	1	0.992 1	1
N_5	0	0.795 2	1	0.969 4
j^*	2.414 8	3.646 0	3.815 9	3.828 7

表 6 特征值计算结果

$K_j(N_0)$	架次 A	架次 B	架次 C	架次 D
N_1	0.999 922	0.999 860	0.999 805	0.999 813
N_2	0.999 943	0.999 905	0.999 876	0.999 877
N_3	0.999 936	0.999 931	0.999 944	0.999 934
N_4	0.999 910	0.999 944	0.999 981	0.999 979
N_5	0.999 865	0.999 927	0.999 982	0.999 974

以上结果与实施监造工作的飞机运营人或授权人反馈信息基本一致,可以说明物元可拓法应用于飞机监造工作评价的可行性。

受不同航司的检查方式和实际情况等因素影响,从客户检查项目入手对监造工作进行评价的结果能反映从监造角度对飞机制造的总体评价,对于运营人和制造厂商具有参考和指导意义。

对运营人而言,不同架次监造工作的评价等级可以更直观地为飞机交付准备工作提供参考,同时也可据此对后续架次监造工作进行调整和改进。各项指标的权重赋值可以为设立重点检查项目提供指导。

对制造厂商而言,可以对不同运营人的监造工作分析总结,有利于灵活地配合运营人完成监造工作,同时也可对重点检查项目加强自检力度或采取相关措施提高飞机质量。

4.5 应用程序开发

运用 Matlab 的 App Designer 模块进行应用程序设计,安装后按要求导入经典域、权重和评价物元即可快速计算评价等级,为后续架次监造工作评估提供方便。如图 1 所示。



图 1 应用程序界面

5 结论

(1)以客户检查项目为基础构建客户检查项目评估体系,包含各区域和阶段的必检环节,与实际监造工作一致。

(2)考虑到传统物元可拓法的局限性,在现有理论上改进,对飞机监造工作进行定量分析。结合实际情况构建物元可拓模型,运用层次分析法

对各项指标赋值,通过计算贴进度进行等级判定。判定结果与实际反馈一致。

(3)相较于原有的监造工作评价方法,基于改进物元可拓理论的定量评价方法提高了监造工作评价的准确性,为航空器运营人及授权人的监造工作提供参考,为后续飞机交付工作提供支持,也为制造商提高飞机质量提供指导。

参考文献

- [1] 葛坚. 基于咨询通告的飞机监造工作要点探讨[J]. 项目管理技术, 2021, 19(12): 87-91.
- [2] 民用航空器监造工作要求: AC-21-AA-2010-16[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2010.
- [3] FENG Y, LEI H. Modeling and analysis of customer preference in civil aircraft manufacturing supervision[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021(1): 12-27.
- [4] 王志伟, 刘曙光, 许健. 基于物元可拓法的轨道交通 PPP 项目风险评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(3): 15-25.
- [5] 王思敏, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于改进物元可拓模型的城市内涝灾害风险评估[J]. 给水排水, 2023, 49(2): 145-152.
- [6] 谭玉东, 文明, 李湘华, 等. 基于改进物元可拓模型的输电项目投资效益评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 113-119.
- [7] 徐达, 周诚, 曹振地, 等. 基于物元可拓法的地面无人作战装备作战效能评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(5): 29-34.
- [8] 栾鑫, 程琳, 邓卫. 城市轻轨交通网络优选的物元可拓表达[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(1): 43-52.
- [9] 乔国华, 苏磊, 张博, 等. 基于可拓理论的电力变压器监造工作的定量评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(14): 80-85.
- [10] 张桂书, 李宏宇, 张龙, 等. 空客与国内飞机监造项目管理对比分析[J]. 项目管理技术, 2018, 16(1): 58-61.
- [11] 曾珂. 国产民机制造商监造工作体系研究[J]. 项目管理技术, 2022, 20(2): 113-117.
- [12] ZHAO H R, LI N N. A novel hybrid evaluation model for the performance of ERP project based on ANP and improved matter-element extension model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(3): 237-245.
- [13] 翟晨孜, 郭小东, 王威. 基于改进物元可拓模型的木结构古建筑地震风险评估[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(1): 125-133.
- [14] 傅泽坤, 刘庆珍. 基于物元可拓模型的电力变压器绝缘老化研究[J]. 电气技术, 2021, 22(5): 32-37.
- [15] 李辉山, 王思莹. 基于多级可拓的砖木结构古建筑安全性评价[J]. 工程管理学报, 2019, 33(2): 81-85.

Quantitative Assessment Method of Aircraft Supervision Based on Improved Matter-Element Extension Model

NI Chenyi

(Maintenance and Delivery Center, COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co. LTD., Shanghai 201323, China)

Abstract: In order to solve the problem of fuzzy standard to assess aircraft supervision, combined with the actual implementation of supervision, a customer inspection items assessment system was introduced. An improved matter-element extension model was used to build the assessment model of supervision work, in order to carry out an accurate quantitative assessment to supervision. In this model, closeness degree was used instead of correlation degree, and each index was quantified to improved the accuracy of assessment. Through the practical example, the result is consistent with the operator's feedback, which verifies the feasibility of the method. Through the accurate quantitative assessment of the supervision work, it provides the reference for operator to carry out supervision work, provides support for the following aircraft delivery work, and provides guidance for manufacturer to improve the quality of aircraft.

Keywords: aircraft supervision; improved matter-element extension model; quantitative assessment; analytic hierarchy process