

柔性工装综合实施效能评价指标体系构建方法*

Construction Method for Comprehensive Implementation Efficiency Evaluation Index System of Flexible Tooling

西北工业大学机电学院 李西宁 徐健 王仲奇
中航飞机西安飞机分公司工装所 李卫平



李西宁

副教授,博士,研究方向为装配与连接技术、板料成形技术,主持和参加“863”计划、国防基础科研、科技支撑计划等项目 10 余项。

飞机数字化柔性装配工装是基于产品数字量尺寸协调体系的可重构模块化、自动化的装配工装系统。与刚性工装相比,柔性工装免除了装配中的专用固定型架、夹具,可缩短工装准备周期、减少生产用地^[1-3],但

为客观评估飞机数字化柔性装配工装的综合实施效能,进一步完善工装技术体系和提高数字化柔性装配技术水平,本文研究了柔性工装综合实施效能评价指标体系的构建方法。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.10.056

结构也更为复杂。实际中,往往只靠工装操作人员或少数专家凭个人直觉主观判别其优劣,缺乏评价工装综合实施效能的客观标准和指导规范,一定程度上限制了柔性工装的推广应用,制约了我国飞机数字化柔性装配技术的发展。

构建评价指标体系是评价柔性工装综合实施效能的基础性工作。一些研究者对评价指标体系的构建问题进行了研究,文献[4]考虑了系统功能性、系统可靠性、界面友好性和效率特征等方面因素,建立了综合评价 CBT 飞机维护系统性能的指标体系;文献[5]在前人研究成果上,分析了机动性、生存能力、战斗火力、发现目标能力和操纵性能 5 个方面因素,构建了飞机空战能力评价指标体系;文献[6]指出影响材料适用性

的主要因素是材料性能、技术成熟度、保障能力和经济可承受性,并构建了评价指标体系。以上针对不同对象构建的评价指标体系存在主观性较强、未筛选指标等问题,也未对评价指标体系的客观性和可信性进行验证,这可能导致评价结果失真。

为客观评估飞机数字化柔性装配工装的综合实施效能,进一步完善工装技术体系和提高数字化柔性装配技术水平,本文研究了柔性工装综合实施效能评价指标体系的构建方法。通过分析柔性工装的全生命周期过程,综合考虑技术水平、装配柔性性和人机功效等因素,构建评价指标体系;基于评价原理和数理统计的思想,对指标进行筛选,在一定程度上,保证了评价指标体系的客观性和可信性。

* 国家科技支撑计划课题(2011BAF13B01和 2011BAF13B07)资助。

初步建立评价指标体系

评价指标体系是根据研究对象和目的,由一系列相互联系的指标构成的有机整体,能够客观反映研究对象某方面特征。工装实施效能是综合描述工装完成飞机装配任务的能力或程度,需全面分析工装属性、结构、特点等方面,构建评价指标体系。

飞机数字化柔性装配工装具有产品的一般属性,其全生命周期主要涵盖了技术开发、应用研究、生产推广和定检与维护等阶段。柔性工装作为一个系统,需综合考虑工装的技术水平、市场需求、对研究领域或产业的影响、效益和风险等方面,构建评价指标体系。

与刚性工装相比,柔性工装从设计、制造、安装到应用,广泛采用数字量的传递方式,由模块化结构单元组成,具有快速自动重构、定位柔性化和夹紧固持柔性化等特点,可实现“一装多用”^[7-9]。因此,尝试提出装配柔性指标,含义:(1)描述对装配类型、产品规格变化的适应能力,指工装可变性和适应性;(2)物料输送能力;(3)以不同次序装配不同零件的能力;(4)描述工装快速重构能力。

此外,由于飞机结构及制造工艺复杂,可能导致工装布局不合理、结构开敞性差。装配中的人机问题时有发生,如工人操作空间不足、装配对象不可视、操作不便,这都将影响工装的综合实施效能,甚至造成工人意外工伤。为准确评估工装的人机功效,需从可达性舒适性、人员的安全性和开敞性等角度评价。

根据上述分析,影响柔性工装综合实施效能的因素众多,遵循客观性、可操作性与可对比性、定量指标与定性指标相等原则,初步构建层次性结构的评价指标体系,见图1。

指标筛选

由于国内对如何评价柔性工装

尚未建立统一标准,加之所需资料缺乏,初建的评价指标体系主观性可能较强,不一定能客观、系统地反映工装综合实施效能;此外,指标间内涵可能存在一定重复性和相关性,或个别指标不具有广泛代表性,这些都将会直接导致评价失真。为得到客观实用、重点突出的评价指标体系,提高指标的可信度和可操作性,需对初建的指标体系进行筛选与验证,剔除内容重复或重要程度低的指标。

目前,用于筛选指标的方法有4种:调查统计法、ISM法、Dematel法和主成分分析法。调查统计法^[10]广泛吸取各方面人员的意见、建议,具有可靠的实践基础,并能用综合评价原理和数理统计的方法对数据进行处理,具有较强的科学性、客观性。

本文采用调查统计法,规划的指标筛选流程如图2所示。

1 设计调查问卷

针对研究对象特点,设计了李克特量表式(Likert-Type Scale)^[11]的调查问卷,确定的评价指标体系由6个一级指标与21个二级指标构成,采用语义学标度的5个测量等级:很重要、比较重要、一般重要、不重要和很不重要。为方便评价者对指标重要程度进行判定和数据处理,对5个等级进行量化处理,依次赋值:5、4、3、2、1。发给26位专家和5名装备技术人员。共回收有效问卷29份,有效率93.55%,符合统计学要求。

2 信度与效度分析

信度是指量表反映实际情况的可靠性和稳定性程度,即测量的一致

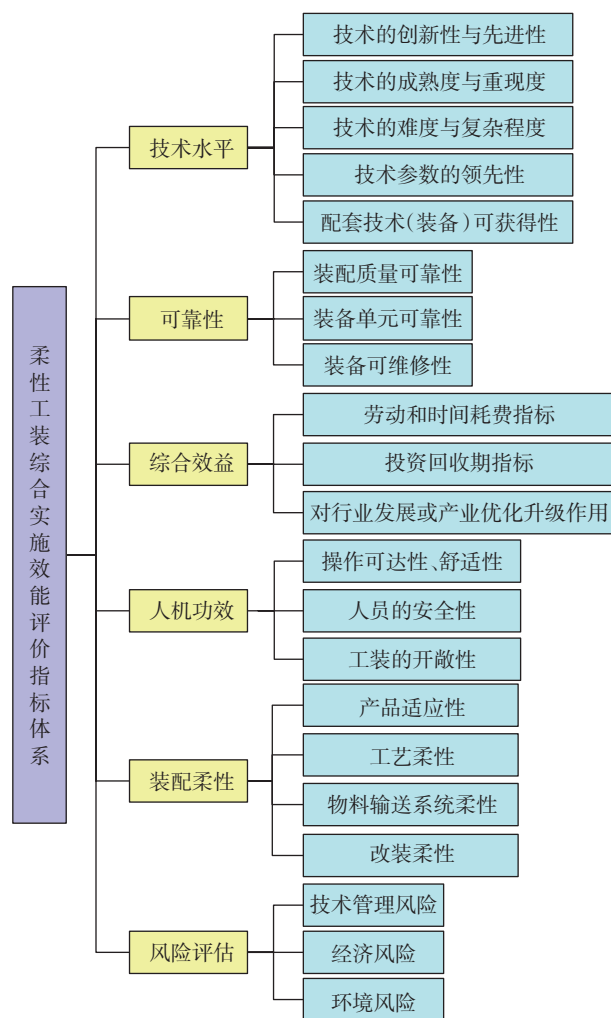


图1 初步构建的柔性工装综合实施效能评价指标体系

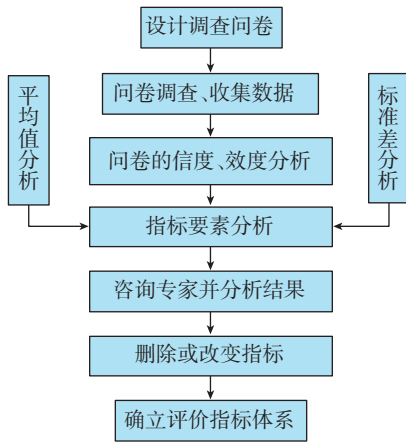


图2 指标筛选流程

性^[12]。任何问卷如果没有经过信度分析,其统计结果的真实性和说服力会受到质疑。本文的信度是指调查对象对问卷中评价指标的信任程度。采用克朗巴哈信度系数 α 衡量信度的大小, $\alpha \in (0, 1)$, 值越大表示问卷数据的一致性信度越高, 有:

$$\alpha = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(1 - \frac{\sum V_i^2}{S^2} \right), \quad (1)$$

其中, n 表示量表中指标的总数, V_i^2 表示评价结果的总方差, S_i^2 表示第 i 个指标得分标准差。取 α 阈值为 0.7, 使用 SPSS 16.0 统计分析软件, 计算各一级指标的信度系数, 见表 1。

表1 评价指标信度系数

一级指标	包含指标数	α
技术水平	5	0.7649
可靠性	3	0.8015
综合效益	3	0.7793
人机功效	3	0.7849
装配柔性	4	0.8159
风险评估	3	0.7639
总体	21	0.7851

由表 1 知, 总体信度为 0.7851, 证明问卷的信度较高, 且 6 个一级指标的信度系数都在 0.7 以上, 符合 α 大于 0.7 的要求, 故可对采集的数据进一步处理和分析。

效度是指调查问卷内容对于所

研究问题的有效性或准确性^[13]。效度高, 即表示测量结果能够显示被测对象的特征, 是对所调查项目真实情况的反映。本文主要分析和判断问卷的内容效度和构架效度。内容效度指衡量调查问卷内容切合研究主题的程度, 其实是检验由概念到指标的经验推演是否符合逻辑, 为:

$$C = \frac{n_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}}, \quad (2)$$

其中, N 为评价人数, n_e 为持肯定评价人数。一般效度系数在 0.7 以上属于高效度, 在 0.3~0.7 之间属于中等效度, 在 0.3 以下是低效度。构架效度是实际所调查结果与所调查项目的同构效度, 它表明了实际调查项目在结构上能够替代所要调查项目的程度。一般用巴特利特球体检

验法和 KMO 测量法判断因子分析与数据之间的适应程度, 并确定因子分析是否有效。巴特利特球体检验以变量的相关系数矩阵为出发点, 零假设相关系数矩阵是单位阵。如果该检验的统计量数值较大, 且其对应的相伴概率值小于用户给定的显著性水平 (一般取 0.01), 则应拒绝该假设, 表示变量各自独立, 适合作因子分析; 反之, 则不能拒绝零假设, 认为相关系数矩阵可能是一个单位阵, 不适合作因子分析。KMO 检验用于检验变量间的偏相关系数是否过小。根据 Kaiser 的 KMO 度量标准: $KMO > 0.9$ 非常适合, $0.8 < KMO < 0.9$ 比较适合, $0.7 < KMO < 0.8$ 一般适合, $KMO < 0.5$ 不适合作因子分析。

有 17 名专家对问卷进行了判断, 其中有 15 人对本问卷持肯定态

表2 指标数据综合处理结果

序号	指标要素	样本容量	最小值	最大值	平均值	标准差
1	技术的创新性与先进性	29	4	5	4.780	0.437
2	技术的成熟度与重现度	29	4	5	4.593	0.511
3	技术的难度与复杂程度	29	3	5	4.171	0.871
4	技术参数的领先性	29	1	4	3.246	1.373
5	配套技术(装备)可获得性	29	3	5	4.381	0.801
6	装配质量可靠性	29	3	5	4.369	0.743
7	装备单元可靠性	29	4	5	4.481	0.618
8	装备可维修性	29	3	5	4.402	0.794
9	劳动和时间耗费指标	29	3	5	4.184	0.953
10	投资回收期指标	29	4	5	4.384	0.749
11	对行业发展或产业优化升级作用	29	3	5	4.195	0.993
12	操作的可达性、舒适性	29	3	5	4.285	0.865
13	人员的安全性	29	4	5	4.307	0.739
14	工装的开敞性	29	3	5	4.108	0.835
15	产品适应性	29	3	5	4.082	0.923
16	工艺柔性	29	2	5	4.184	1.161
17	物料输送系统柔性	29	1	5	3.608	1.605
18	改装柔性	29	3	5	4.204	0.830
19	技术管理风险	29	4	5	4.619	0.538
20	经济风险	29	2	5	3.485	1.269
21	环境风险	29	3	5	4.349	0.829

度,据公式得: $C=76.47\%$,即本问卷调查的效度系数为 0.7647,内容效度很高。使用 SPSS 16.0 统计分析软件,得巴特利特球度检验统计的观测值为 1084.298,相应概率 sig. 取值为 0,认为相关系数矩阵与单位阵间存在显著差异,原假设被拒绝;同时,KMO 值为 0.824,适合作因子分析,并可知方差累计贡献率为 72.83%,具有良好的架构效度。

3 算术平均值和标准差分析

依据调查问卷中对各指标要素的评判情况,求各指标的算术平均值,可推断被调查者对各指标重要程度的判定。此外,由于被调查者对指标重要程度的看法分布不均匀,有可能出现平均值得分相同的两项指标之间的重要性分布不相同,还必须对各指标得分标准差及一致性进行分析,其实质就是检验各指标对其算术平均数的偏差(离散)程度,标准差越大,说明被调查者对指标的重要程

度的意见越不一致。各指标的算术平均值及标准差计算结果见表 2。

由表 2 可知,技术的创新性与先进性、装配质量可靠性、工装的开敞性等指标的得分都比较高,说明这些指标在柔性工装综合实施效能评价指标中的重要程度较高。然而,编号 4、17、20 的指标得分均值在 4.0 以下、标准差在 1.0 以上,表明这 3 个指标的重要程度可能不高,被调查者对这 3 个指标的重要程度判定意见分歧较大,进一步咨询相关专家意见,决定剔除这 3 个指标。最终构建的评价指标体系包含 6 个一级指标和 18 个二级指标,如图 3 所示。

结束语

本文综合考虑工装技术水平、可靠性、装配柔性和人机功效等方面因素,初步构建了飞机柔性工装综合实施效能评价指标体系。为解决构建了评价指标体系过程存在主观性、

盲目性和片面追求指标的全面性等问题,设计了李克特量表格式调查问卷,检验了指标信度和效度,分析了各指标平均值和标准差,实现了指标筛选,一定程度上保证了评价指标体系的客观性、可信性。下一步,将以建立的评价指标体系为基础,构建评价模型,评价柔性工装综合实施效能。

参考文献

- [1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9):28-32.
- [2] 邹冀华, 刘志存. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7):1368-1373.
- [3] 李西宁, 胡匡植, 李维亮, 等. 飞机数字化柔性装配工装技术. 航空制造技术, 2013(12): 40-43.
- [4] 杜鹤民, 余隋怀, 初建杰, 等. 基于 Fuzzy AHP 的 CBT 飞机维护系统评价. 航空制造技术, 2009(18): 96-99.
- [5] 刘亚斌, 刘更, 刘文彬. 基于 AHP-模糊法的飞机空战能力指标评级. 航空制造技术, 2013(8): 68-70.
- [6] 郭启雯, 才鸿年, 王富趾, 等. 材料适用性评价指标体系构建研究. 材料工程, 2009(9): 9-12.
- [7] 杜兆才. 蓬勃发展的数字化柔性装配技术. 航空制造技术, 2012(1):100-101.
- [8] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究. 航空制造技术, 2010(10): 58-61.
- [9] 郭飞燕, 王仲奇, 康永刚等. 基于坐标孔的数字化柔性工装定位技术. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 720-726.
- [10] 张小宁, 林航飞, 陈小鸿, 等. 剩余最短路径算法应用于起迄点交通调查统计. 上海: 同济大学学报, 2006, 34(10): 1335-1339.
- [11] 孙超平, 杨善林. 战略 SWOT 决策模型的构建及其实证研究. 系统仿真学报, 2009(3): 868-872.
- [12] 程贲, 姜江, 谭越进, 等. 基于证据推理的武器装备体系能力需求满足度评估方法. 系统工程理论与实践, 2011, 31(11): 2210-2216.
- [13] 郭小红, 徐小辉, 王超, 等. 卫星参数趋势预测 EMA 熵组合法. 飞行器测控学报, 2013(2): 118-122.

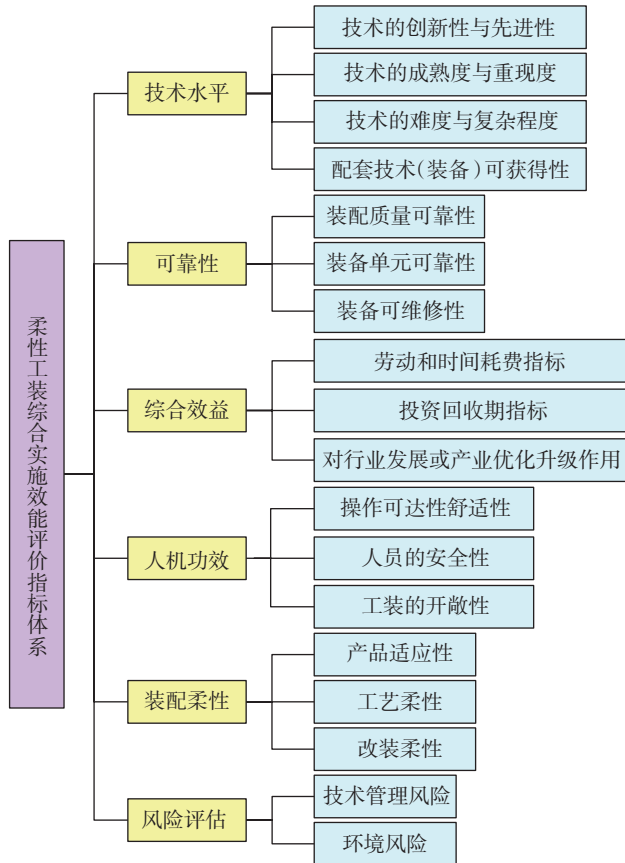


图3 柔性工装综合实施效能评价指标体系

(责编 春早)