

军机总装装配大纲质量风险等级评价模型研究



杨二豪¹, 刘玉松¹, 黄吉传², 刘正刚¹

1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092

2. 空军装备部驻成都地区第一军事代表室, 四川 成都 610092

摘要:针对军机总装阶段质量风险识别与产品制造过程脱节、风险管控重点不明确等问题,结合总装以装配大纲为基础制造单元的特点,通过对过程失效模式及影响分析(PFMEA)评价体系的局限性进行优化,提出一种装配大纲质量风险等级评价模型,定义了风险等级系数RLC的计算方法,并给出风险评价要素的评价方法。应用结果表明,通过该模型识别的装配大纲质量风险等级与实际情况相一致,基于模型风险等级评价结果的质量管控使平均单机不合格数下降73.12%。所提模型的装配大纲质量风险等级评价是正确并有效的,可为实际应用提供指导。

关键词: 风险等级评价; 军机总装; 装配大纲; PFMEA

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.01.010

军机制造是复杂的系统工程,是离散式制造和总装的有机结合,为符合国际适航管理需求,适应军机多批次、小批量、单架次的生产管理特点,国内外军机总装普遍采用基于装配大纲(AO)的生产管理模式。AO是工艺部门根据工程设计要求、现有工艺水平和质量保证要求,编写的指导生产的工艺文件^[1],同时也是生产、检验的记录文件,操作人员根据AO内容完成规定的装配或试验动作,以形成飞机最终的质量状态。目前,军机总装AO主要包含工艺信息、生产信息,缺少质量风险信息,因风险识别不到位的质量问题时有发生,加之现阶段军机总装风险管理现状是重视项目整体的技术风险、费用风险和进度风险等,轻视产品制造过程中具体环节的质量风险,造成缺陷的产生甚至传递。Baiman等^[2]指出,缺陷产品进入市场后将产生外部故障成本,包括维修成本、运输成本,以及企业形象等。对于军机而言,产品缺陷可能影响部队战训任务,导致外部故障处置归零代价非常高,如果离开装备使用安全,战斗力将无从谈起^[3]。因此,对产品制造过程质量风险的预先识别与评价、划分质量风险等级、建立分等级的质量管控机制十分重要。

目前,针对产品制造过程常用的质量风险评价方法是

过程失效模式及影响分析(PFMEA)。PFMEA起源于20世纪50年代的美国,80年代中期我国颁布了相应的PFMEA技术标准^[4]。PFMEA至今已在汽车、船舶、食品^[5-7]等多个领域广泛应用,取得了良好的效果。研究表明,PFMEA目前主要应用于生产过程稳定的大批量、标准化制造过程的质量风险分析^[8-9],通过计算风险优先数(RPN)来评价制造过程的风险等级^[10-11]。然而,对于军机总装小批量、多状态生产模式,在质量风险识别与评价过程中,工程技术人员需要综合分析产品制造过程中的人、机、料、法、环等构成因素,既要考虑不同因素之间的相对重要性,也要考虑各因素在产品制造过程中因频繁调整带来的不确定性。因此,军机总装过程的质量风险识别与评价是一个复杂的、涉及多风险因素的多准则决策问题,难以用基于PFMEA简单评定准则表^[12]的RPN计算结果进行准确评价。

为此,结合军机总装以AO为基础制造单元的生产模式特点,通过对PFMEA评价要素进行适应性修改,提出了AO风险等级评价模型以及风险接受准则,以解决军机总装复杂生产模式下的产品制造过程风险评价与分级管控问题,并将基于模型输出的风险管控方法应用于国内某主机

收稿日期: 2022-07-25; 退修日期: 2022-11-05; 录用日期: 2022-12-06

引用格式: Yang Erhao, Liu Yusong, Huang Jichuan, et al. Research on quality risk level evaluation model based on military aircraft assembly order[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(01): 76-83. 杨二豪, 刘玉松, 黄吉传, 等. 军机总装装配大纲质量风险等级评价模型研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(01): 76-83.

厂C的军机总装制造过程中,验证其有效性和可行性。

1 PFMEA的局限性

PFMEA评价体系的核心是对产品制造过程潜在失效模式的评价要素进行判定与评分,并按公式 $RPN = S \times O \times D^{[13]}$ 计算RPN值,作为对潜在失效模式风险等级的评价依据,RPN值越大,失效模式的危害性越大。这里的评价要素指严重度(Severity)、频度(Occurrence)、探测度(Detection),严重度S用以评价失效模式的影响程度,频度O用以评价失效模式发生的可能性大小,探测度D用以评价失效模式的检验难度。

PFMEA适用于生产稳定、自动化程度高、过程控制体系完善的产品制造过程,但对于生产波动大、以手工作业为主的军机总装而言,存在明显的局限性:(1)PFMEA评价体系中,严重度S的评价标准无法准确描述军机制造过程及产品失效对于产线、质量、产品功能等的影响,且评价维度单一;(2)由于军机总装小批量的生产模式难以获得足够的失效发生频数,因此,无法采用PFMEA中频度O的评价标准对失效模式的频度做出正确评定;(3)由于军机总装多状态的特点难以开发具有较强针对性且成本可接受的探测方法^[14],且检验属于非增值活动,可以通过强化工序执行过程进行质量保证,前提是实现军机制造过程构成因素可评价。因此,在对潜在失效模式进行判定时需要引入新的评价要素,用以评价制造过程构成因素的重要程度,进而提升风险识别的区分度。

2 AO风险等级评价模型构造

风险等级即对质量风险进行区分,依据风险对结果的影响程度对风险进行排序,以评估质量风险的等级。AO风险等级评价模型,以AO为最小评价单元,结合军机总装特点对PFMEA评价体系的局限性进行优化,具体为对严重度S、频度O的评价标准进行重新描述,引入并定义因素水平(Factor),由严重度S、频度O、因素水平F组成AO风险等级的评价要素。换言之,AO风险等级是频度和程度的综合度量,其结构模型如图1所示。

为实现风险等级的量化评价,定义AO风险等级系数(RLC)为因素水平F、频度O和严重度S的乘积,计算公式如下。

$$RLC = F \times O \times S \quad (1)$$

式中,F为因素水平,指产品制造过程构成因素对制造过程的重要程度;O为频度,指风险发生的概率;S为严重度,指

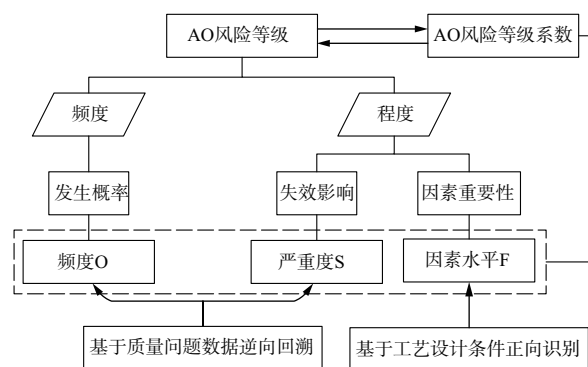


图1 风险等级评价递阶层次结构模型

Fig.1 Risk level evaluation of hierarchical structure model

风险发生所产生后果对过程或产品的影响程度。

2.1 因素水平评价方法

因素水平F是指AO执行所需构成因素对制造过程的重要程度,由工程技术人员基于军机的系统原理结合工艺流程设计进行识别与定义。构成因素主要是指在工艺设计层面从4M1E^[15]的角度出发,即人(Man)、机(Machine)、料(Material)、法(Method)、环(Environment),识别军机在内外场等不同环境下的状态及人员、方法、设备的适应性等。因素水平F采用数学计算的方法进行描述。基于军机总装不同专业在总装环节的不同特点,确定数学计算的强相关变量。目前,国内外军机总装专业可划分为装配方向和试验方向。

2.1.1 装配方向

包括电气电网敷设、导管及成附件安装、大部件装配与测量等。其工作特点是以人工手动操作为主,工作互通性较强。

现定义装配因素水平 F_z ,计算公式如下

$$F_z = k_1 \times (R_1 \times \cdots \times R_n) + k_2 \times (J_1 \times \cdots \times J_n) + k_3 \times (L_1 \times \cdots \times L_n) + k_4 \times (F_1 \times \cdots \times F_n) + k_5 \times (H_1 \times \cdots \times H_n) \quad (2)$$

式中: R_n 、 J_n 、 L_n 、 F_n 、 H_n 分别为人、机、料、法、环, n 取值由评价维度决定; $k_1 \sim k_5$ 为权重系数。

装配工作一般会经历开工条件评估(Method & Environment)、库房领料(Material)、工具准备(Machine)、上机操作(Man)等步骤,但所涉及的4M1E因素对飞机制造过程以及最终质量状态的重要程度不同,需要考虑不同因素之间的相对重要性,故在式(2)中引入了权重系数。此外,总装环节的4M1E中单一因素通常是由多个子因素构成的,以人因素 R_n 为例,其子因素包括但不限于操作人员数量

R_1 、技能水平 R_2 等,从AO执行以及保证过程质量的角度分析, R_1 和 R_2 不是相互独立的子集,而是相互影响的交集,因此, R_n 在式(2)中的表现形式为多项相乘。综上, n 的取值原则如下:仍以人因素 R_n 为例,其子因素包括操作人员数量、技能水平等,将每个子因素视为影响过程质量的一个评价维度,若只考虑单一评价维度, n 取值1,考虑两个维度,则 n 取值2,以此类推。 J_n 、 L_n 、 F_n 、 H_n 同理。根据上述原则,在工程应用时可视情况考虑相对重要维度的影响程度,以简化测算过程。

2.1.2 试验方向

包括全机导通、液压总调、系统通电、飞控试验等。其工作特点是需要借助外部设备,尤其需要考虑系统交联程度以及上电、上压情况等。

现定义试验因素水平 F_s ,计算公式如下

$$F_s = k_1 \times (R_1 \times \cdots \times R_n) + k_2 \times (J_1 \times \cdots \times J_n) + k_3 \times (F_1 \times \cdots \times F_n) + k_4 \times (H_1 \times \cdots \times H_n) \quad (3)$$

式中, R_n 、 J_n 、 F_n 、 H_n 分别为人、机、法、环, n 取值由评价维度决定; $k_1 \sim k_4$ 为权重系数。

与式(2)不同的是,因总装试验启动的前置条件是机上装配状态已达到试验要求,因此,式(3)中不再单独评价料因素 L_n 。

2.2 频度评价方法

频度O是指AO质量风险在军机制造过程中发生的可能性大小,用发生概率量化评价。频度O采用分级评分的方法进行描述。在PFMEA评价体系中,计算频度O需要对大量的生产数据进行统计分析,为解决数据量不足的问题,郑国栋^[16]等提出采用“相似零件”的统计方法。借鉴该方法,依据工艺流程将总装工作划分为电气电网敷设、管路装配、大部件装配、试验4种类别,在不同类别中将质量特征相似的质量问题类型合并为一类,形成“相似类型”,通过统计分析“相似类型”发生概率的百分比,确定风险发生的频度数,从而制定频度O的评定准则,见表1。

2.3 严重度评价方法

严重度S是指AO质量风险产生后果对过程或产品的影响程度。严重度S采用分级评分的方法进行描述。在PFMEA评价体系中,由于评价维度单一且针对性不强,因此严重度S无法真实反映质量风险对军机的影响程度。因此,参考GJBZ 1391—2006中武器装备常用严酷度类型及定义、GJB 5711—2006中装备质量问题定义,以及PFMEA—2019中严重度评估标准,结合军机总装制造特征、军机功能属性等,制定严重度S评定准则时,将评价维度划分为对过程的影响和对顾客/产品的影响,既要考虑军机在出总装前对装

表1 频度(O)评定准则

Table 1 Occurrence evaluation criteria

频度	风险预测	装配风险概率 $P/\%$			试验风险概率 $P/\%$
		电气电网敷设	管路装配	大部件装配	
10	很高(持续发生)	$P \geq 30$	$P \geq 30$	$P \geq 30$	$P \geq 50$
9	高(经常发生)	$20 \leq P < 30$	$20 \leq P < 30$	$20 \leq P < 30$	$25 \leq P < 50$
8		$10 \leq P < 20$	$10 \leq P < 20$	$7.5 \leq P < 20$	
7		$5 \leq P < 10$	$5 \leq P < 10$	$4.5 \leq P < 7.5$	
6	中等(偶尔发生)	$3 \leq P < 5$	$3 \leq P < 5$	$3 \leq P < 5$	$10 \leq P < 25$
5		$1.5 \leq P < 3$	$1.5 \leq P < 3$	$2 \leq P < 3$	
4		$0.5 \leq P < 1.5$	$0.5 \leq P < 1.5$	$1 \leq P < 2$	
3	低(很少发生)	$0.2 \leq P < 0.5$	$0.15 \leq P < 0.5$	$0.5 \leq P < 1$	$0.1 \leq P < 10$
2		$0.1 \leq P < 0.2$	$0.1 \leq P < 0.15$	$0.1 \leq P < 0.5$	
1	很低(不太可能发生)	$P < 0.1$	$P < 0.1$	$P < 0.1$	$P < 0.1$

配或试验过程的影响程度,还要考虑军机出总装后对试飞和交付的影响程度,同时将影响程度与价值相关联实现部分标准的量化评价,见表2。

2.4 风险接受准则

依据军机总装过程对质量风险的承受能力或容忍度,制定风险接受准则,采用风险等级进行描述。GBJ 5852—2006给出了风险接受准则示例,对风险等级的划分进行了说明,在此基础上,考虑到军机总装AO数量、重要程度以及可执行性等,将AO风险等级划分为超高风险、高风险、中风险和低风险,形成AO风险等级的四级风险接受准则。一般情况下,超高风险为不可接受风险,必须采用严格的控制措施消除;高风险为不可接受风险,需要采取合理的控制措施消除、转移或降低风险等级;中风险为不可接受风险,需要控制和监控;低风险为可接受风险,但必须进行监测,必要时需采取相应的控制措施。在工程应用时,通过识别AO的风险评价要素F、O、S并计算风险等级系数RLC对潜在质量风险进行区分和排序,参考风险接受准则确定AO风险等级,形成AO风险清单。

3 应用实例分析

国内主机厂C主要承担军机电网安装、系统管路安装、整机大部件对合、系统安装调试与试验等总装集成任务,其基础制造单元为AO。现以主机厂C为算例,简述AO风险等级评价模型的应用方法及效果。

3.1 确定AO风险等级

3.1.1 因素水平F

由式(2)和式(3)可知,因素水平F的本质是对装配或试

表2 严重度(S)评定准则
Table 2 Severity evaluation criteria

严重度	对过程的影响		对顾客/产品的影响	
	标准	影响程度	标准	影响程度
8	不符合安全性或造成重大损失	危及人身安全;或者直接经济损失达800万元以上	主要功能丧失或功能降低	影响飞行安全,包含等级事故,死亡事故;或者武器装备主要功能丧失
7		危及人身安全;或者直接经济损失达100万元以上		影响飞行安全,包含事故征候,伤残事故;或者武器装备主要功能下降
6	生产线中断	100%过程产品需要报废,生产线关闭	次要功能丧失或功能降低	不影响飞行安全,但武器装备次要功能丧失
5	生产线速度显著降低	部分过程产品必须报废,偏离基本生产过程;或者直接经济损失达10万元以上		不影响飞行安全,但武器装备次要功能下降
4	生产线速度中等降低	部分产品必须离线返工后再被接受;或者直接经济损失达1万元以上	干扰	引起顾客直接抱怨或者投诉
3		发生成批次、重复质量问题或者超差,必须在线返工		存在外观或功能性问题,且能被顾客轻易识别
2	生产线速度轻度降低	发生质量问题但不会造成重大损失,必须在线返工;或者对生产过程造成不便		存在外观或功能性问题,但不易被顾客识别
1	没有影响	没有可识别的影响	没有影响	没有可识别的影响

验过程构成因素的评估及其综合计算。因此,F的计算初始条件是:基于主机厂C的工艺设计,识别并确定影响AO执行的4M1E因素,进而建立各因素在不同情况下的子因素评定准则,见表3、表4。根据表3,可将式(2)简化如下

$$F_z = k_1 \times R_1 + k_2 \times J_1 + k_3 \times L_1 + k_4 \times (F_1 \times F_2) + k_5 \times (H_1 \times H_2) \tag{4}$$

常见的权重系数确定方法有AHP层次法、CRITIC法、熵值法、专家经验法等,其中,专家经验法的优势是对数据统计量要求不高^[17]。根据有经验的专家结合自身的知识和经验对评估对象的可能性做出判断,评定权值的专家成员具备本专业5年以上工作经验,并统一权重确定规则,主机厂C采用专家经验法对式(4)中权重系数进行赋值,取 $k_1=0.2$ 、 $k_2=0.3$ 、 $k_3=0.15$ 、 $k_4=0.15$ 、 $k_5=0.2$ 。

根据表4,可将式(3)简化如下

$$F_s = k_1 \times R_1 + k_2 \times J_1 + k_3 \times (F_1 \times F_2) + k_4 \times (H_1 \times H_2 \times H_3 \times H_4 \times H_5) \tag{5}$$

采用专家经验法对式(5)中的权重系数进行赋值,取 $k_1=0.1$ 、 $k_2=0.2$ 、 $k_3=0.3$ 、 $k_4=0.4$ 。

3.1.2 频度O和严重度S

由频度O和严重度S的评价方法可知,其输入为质量问题历史数据。航空装备在生产以及使用的过程中会产生很多的数据^[18],数据的来源因主机厂情况而异,一般来源但不限于制造、交付或维修过程的失效清单、顾客反馈问题清单、系统性诊断报告等,应涵盖军机研制、生产、接装、外场使用维护全过程。主机厂C通过建立质量数据信息反馈链,使得数据信息逐级正向传递、逆向反馈,利用数据中台,形成信息快速响应闭环,如图2所示。将数据信息回溯至相应的装配或试验AO中,依据表1和表2即可得出O和S的取值。

表3 装配4M1E因素评定准则
Table 3 4M1E factors evaluation criteria for assembly

子因素 \ 取值	1	3	5
M ₁ 所需作业人数(个)或技能情况	单人作业	多人作业(2~4)	多人作业(>5)或技能要求高
J ₁ 所需工装、工具、设备等情况	简单易操作	数量(种类)较多或操作较复杂	操作难度大且存在操作风险(如航吊、测量设备、通电设备等)
L ₁ 作业对象价值/万元	<5	5~100	>100
F ₁ 执行前是否需要评估前置条件	不需要	需要且评估维度≤1	需要且评估维度>1
F ₂ 执行后是否需要补充实验	不需要	需要	需要且存在风险(如上电、上压等)
H ₁ 执行时所在舱位空间特性	开敞空间	狭窄空间	狭窄空间且操作受限制
H ₂ 执行时所处环境或状态	总装环境	试飞环境	外场环境或非正常工艺设计状态

表4 试验4M1E因素评定准则

Table 4 4M1E factors evaluation criteria for test

子因素\取值	1	2	3
M ₁ 所需作业人数(个)或技能情况	单人作业	多人作业(2~4)	多人作业(>5)或技能要求高
J ₁ 所需试验设备数量/台	≤1	2~4	≥5
F ₁ 执行时工序数量/道	≤5	6~10	≥11
F ₂ 执行时系统交联程度/个	1~2	3~5	≥6
H ₁ 执行时所处环境或状态	总装环境	试飞环境	外场环境或非正常工艺设计状态
H ₂ 执行时上电情况	不上电	局部上电	全机上电
H ₃ 执行时上压情况	不上压	单系统上压	双系统上压
H ₄ 执行时涉及系统类型	无系统	风冷系统	液冷系统
H ₅ 执行时干扰情况	无干扰	高压或噪声	高压和噪声

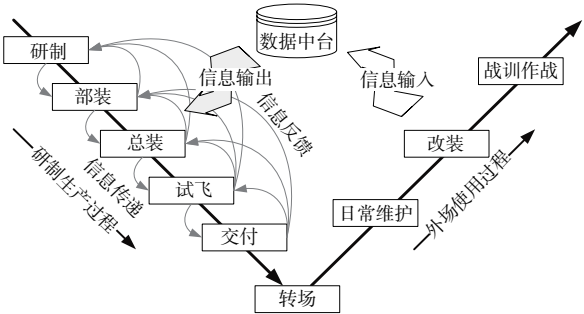


图2 军机全生命周期信息反馈链模型

Fig. 2 Information chain model for the entire life cycle of military aircraft

3.1.3 风险等级系数与风险等级

以主机厂C的装配和试验AO为评价对象,通过式(1)可以测算出每本AO的风险等级系数RLC(F、O、S)。基于风险接受准则建立适用于主机厂C的风险等级系数与风险等级的对应关系,见表5。表6列举了部分AO风险等级。

表5 风险等级系数与风险等级对应关系

Table 5 Corresponding relationship between RLC and risk level

专业 风险等级	装配方向	试验方向
超高风险	90 < R	170 < R
高风险	60 ≤ R ≤ 90	110 ≤ R ≤ 170
中风险	20 ≤ R < 60	50 < R < 110
低风险	R < 20	R ≤ 50

统计主机厂C历史上产生过质量问题的AO,以质量问题数为评价标准,分析质量问题数排名前20的AO与AO风险等级的相关性,如图3所示。

分析可知,历史上产生质量问题数较多的AO(>10条)均为超高风险等级,质量问题数较少的AO(<3条)中

表6 部分AO的风险等级

Table 6 Risk level of some AO

专业	AO名称	F	O	S	RLC	风险等级
装配	高压管路气密试验	4.3	8	9	172	超高风险
	前支柱安装	2.7	9	3	72.9	高风险
	线束网络导通检查	3.1	9	2	55.8	中风险
	飞附机匣插头对接	1.4	3	3	12.6	低风险
试验	起落架应急放调试	12	9	2	216	超高风险
	大气系统综合试验	6.2	10	2	124	高风险
	系统首次通电检查	4.8	10	2	96	中风险
	传感器阻抗检查	1.3	9	2	23.4	低风险

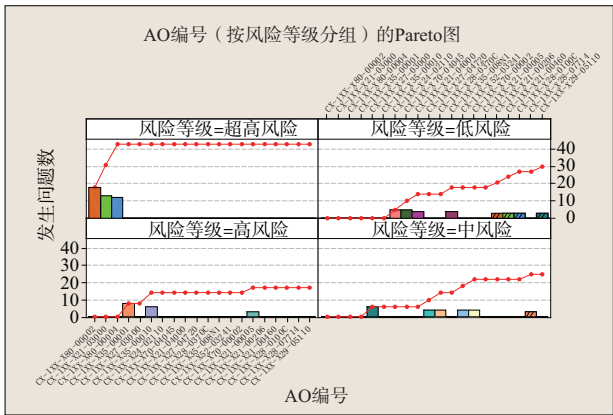


图3 质量问题与AO关联性分析

Fig. 3 Correlation analysis between failure and AO

低风险等级占比为66.67%,说明AO风险等级评价模型对风险识别的准确性,验证了模型结果与主机厂C实际情况一致。

3.2 基于AO风险等级的质量管控方法

基于AO风险等级评价模型的质量管控方法以实现军机质量状态的AO为载体,将质量管控重点从风险事件转为风险过程,通过计算RLC(F、O、S)科学区分AO风险的高

中低水平,在质量管控活动中,根据AO风险等级进行分类施策,进而提高质量管控的效率效能,具体做法如下:

(1) 在技术层面,建立制造端风险等级、检验端质量问

题、控制端改进策略三者的逻辑关系,通过循环迭代,从源头上对潜在质量风险进行有效控制,以渗液/油为例,质量风险控制逻辑如图4所示。

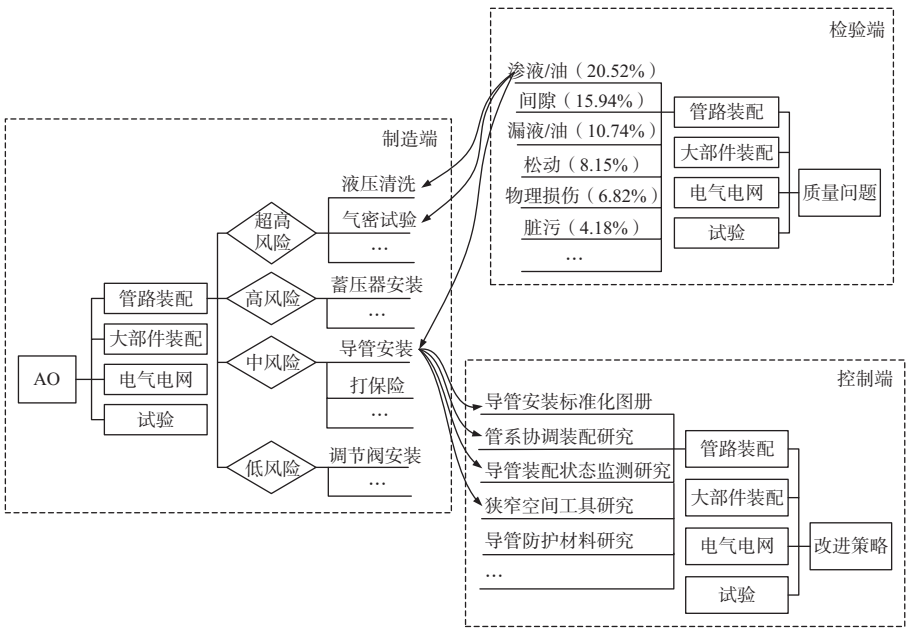


图4 基于AO风险等级的管控策略

Fig. 4 Control strategy based on AO risk level

(2)在管理层面,提高高风险以上AO审签级别,或利用信息技术实现AO风险显性化,以对操作过程进行风险提示等;或在计划排产时,使AO风险等级与操作技能等级相匹配,实现人力资源合理分配等;或在检验验收时,根据AO风险等级合理规划检验验收细则,将高风险AO纳入军检、总检、专检项目,将中低风险AO纳入自检项目,减少同质化检验,缩短军机交付周期等。

3.3 基于AO风险等级的质量改进成效

军机总装环节主要以手工作业为主,经统计分析,自模型实施以来,人为因素相关的质量问题发生概率明显降低,见表7。

总体而言,主机厂C应用AO风险等级评价模型对军机总装AO的风险等级进行了准确区分,并在实施基于AO风险等级的质量管控方法后,各项质量指标均有较大程度改善,平均单机不合格数下降73.12%,单机超差数下降44.83%,单机报废数下降53.85%,产品整体质量控制水平得到提升。

4 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)本文通过对总装产品制造过程特点的综合分析,以

表7 质量问题发生概率统计

Table 7 Probability of failure statistics

一级类型	二级类型	下降率/%
表面质量	物理损伤	57.94
	胶质量	50.93
装配不符合	保护不到位	50.80
	松动	78.57
	保险不规范	85.71
	安装不到位	18.41
间隙/阶差	间隙	87.50
其他	多余物	100

总装基础制造单元AO为载体,提出以因素水平F、频度O及严重度S为评价要素的AO风险等级评价模型,定义并给出风险等级系数RLC(F、O、S)的计算方法,实现了AO风险等级的量化评价,并依据总装过程对风险的承受能力制定了风险接受准则。

(2)本文提出的AO风险等级评价模型的评价结果能为军机制造过程质量风险精准管控提供输入,有利于对装备整个形成过程中的关键特性进行监督,提高质量监督效能,在主机厂C的应用实践中,取得了较好的质量改进效果。

参考文献

- [1] 吴东琦, 朱文华, 王琛, 等. 飞机三维装配大纲技术的研究[J]. 现代机械, 2010(1):45-48.
Wu Dongqi, Zhu Wenhua, Wang Chen, et al. Research on the 3D AO technology for airplane[J]. Modern Machinery, 2010(1): 45-48. (in Chinese)
- [2] Baiman S, Fischer P E, Rajan M V. Information, contracting, and quality costs[J]. Management Science, 2000, 46(6): 766-789.
- [3] 徐明, 宫綦. 军机适航与安全性发展综述[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10):13-20.
Xu Ming, Gong Qi. Overview of airworthiness and safety development of military aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10):13-20. (in Chinese)
- [4] 张杰. 基于PFMEA的M公司生产管理风险研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Zhang Jie. Application study on PFMEA management in the production process of M company[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [5] Banduka N, Tadic D, Macuzic I, et al. Extended process failure mode and effect analysis (PFMEA) for the automotive industry: the FSQC-PFMEA[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2018, 13(2):206-215.
- [6] Stavrou D I, Ventikos N P. Risk evaluation of ship-to-ship transfer of cargo operations by applying PFMEA and FIS[C]// Reliability & Maintainability Symposium. IEEE, 2015:1-7.
- [7] Das I, Panchal D, Tyagi M. A novel PFMEA-Doubly TOPSIS approach-based decision support system for risk analysis in milk process industry[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2021, 39(1):1-29.
- [8] 刘卫东, 胡坤, 康密军, 等. 小批量定制生产模式计算机辅助PFMEA技术的实现[J]. 机械设计与制造, 2016(12):260-262, 266.
Liu Weidong, Hu Kun, Kang Mijun, et al. Realization of computer aided PFMEA technology in small-batch customization production model[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(12):260-262, 266. (in Chinese)
- [9] Xi H, Zhang Q, Song P. Application of PFMEA method to printed circuit board component assembly[J]. Electronics Process Technology, 2014, 35(5):286-288.
- [10] 夏蓓鑫, 陈鑫, 李龙, 等. 采用模糊层次分析法的PFMEA方法改进及应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 868-874.
Xia Beixin, Chen Xin, Li Long, et al. Improvement and application of PFMEA using fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2017, 38 (6):868-874. (in Chinese)
- [11] 朱易, 徐克林. 模糊综合评价的PFMEA在ABS阀体制造中的应用[J]. 工业工程, 2009, 12(4):82-85.
Zhu Yi, Xu Kelin. Application of PFMEA with fuzzy comprehensive evaluation in ABS valve manufacturing[J]. Industrial Engineering Journal, 2009, 12(4):82-85. (in Chinese)
- [12] 施文婧, 闫莉. 基于PFMEA的SMT回流焊质量改善方法[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(3):114-118.
Shi Wenjing, Yan Li. Quality improvement of SMT reflow soldering based on PFMEA[J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(3):114-118. (in Chinese)
- [13] Mohammad B, Soleyman I, Majid B K. Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019(5):221-232.
- [14] 刘卫东, 胡坤, 郑慧萌, 等. 多品种小批量定制生产模式的工艺失效模式及影响分析[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22 (6):1485-1493.
Liu Weidong, Hu Kun, Zheng Huimeng, et al. PFMEA technology of multi-varieties and small batch customization mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6):1485-1493. (in Chinese)
- [15] 毕建玮. 浅谈4M1E分析法在总装工艺同步工程中的应用[J]. 装备制造技术, 2013(10):85-86.
Bi Jianwei. On the application of the method of 4M1E in the simultaneous engineering of general assembly[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(10):85-86. (in Chinese)
- [16] 郑国栋, 王杨, 赵明, 等. PFMEA在航天复合材料结构件成形中的应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(8):109-114.
Zheng Guodong, Wang Yang, Zhao Ming, et al. Application research of PFMEA in aerospace composite structural parts forming[J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2019(8): 109-114. (in Chinese)
- [17] 丁思云, 李香, 沈宗沼, 等. 基于专家经验法的机械密封基本

事件失效概率分析方法[J]. 液压气动与密封, 2020(2):31-35.
Ding Siyun, Li Xiang, Shen Zongzhao, et al. Failure probability analysis method of mechanical seal basic events based on expert experience method[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020(2):31-35. (in Chinese)

[18] 曲昌琦, 周锐, 杜宝, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库体系研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12):61-67.
Qu Changqi, Zhou Rui, Du Bao, et al. Research on PHM data system architecture for aviation equipment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(12):61-67. (in Chinese)

Research on Quality Risk Level Evaluation Model Based on Military Aircraft Assembly Order

Yang Erhao¹, Liu Yusong¹, Huang JiChuan², Liu ZhengGang¹

1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu 610092, China

2. The First Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Chengdu, Chengdu 610092, China

Abstract: In order to solve the problems of disconnection between quality risk identification and product manufacturing process and unclear focus of risk control in the military aircraft final assembly stage, combined with the characteristics of assembly manufacturing unit based on assembly order, a quality risk level evaluation model based on assembly order is proposed by optimizing the limitations of PFMEA. The risk level coefficient (RLC) is defined, and the risk factors evaluation method is given. The application results show that the assembly order quality risk level identified by the model is consistent with the actual situation, and the average failure rate of single military aircraft decreases by 73.12% through quality control based on the model evaluation results. It is concluded that the assembly order quality risk level evaluation is correct and effective, which can provide guidance for practical application.

Key Words: risk level evaluation; military aircraft assembly; assembly order; PFMEA