

文章编号: 1674-8190(2024)03-090-11

# 一种面向飞机制造和维护的质量风险识别与评估方法

胡林, 胡晓

(航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091)

**摘要:** 各飞机制造厂一直在努力减少飞机制造与使用维护过程中的质量安全事件。单纯使用生产制造阶段的过程故障模式影响分析(PFMEA)方法进行质量风险识别与评估时,存在分析不包含飞机使用维护过程、失效模式识别率和准确性不高、建议措施不完善等问题。针对上述问题,提出质量风险识别与评估方法,将制造过程PFMEA范围拓展到使用维护过程,并以设计故障模式影响分析(DFMEA)作为PFMEA的输入,以扩大分析范围,改善失效模式的识别率和准确性;使用树形分析图方法对风险控制措施进行覆盖性和重复性分析,获得完整、最简措施集。使用该方法对某液压系统一根液压泵循环散热导管进行分析,结果表明:本文提出的方法可以更全面、更准确地分析飞机制造与使用维护过程中的质量风险,获得更为优化的质量风险控制措施集合。

**关键词:** 飞机制造; 维护; 风险识别; 风险评估; FMEA; 树形分析图

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.09

## A quality risk identification and assessment method for aircraft manufacturing and maintenance

HU Lin, HU Xiao

(AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

**Abstract:** Aircraft manufacturers have been striving to reduce quality and safety incidents during aircraft manufacturing, operating, maintenance phases. If only using the Process Failure Mode Effects Analysis (PFMEA) method for quality risk identification and assessment, there are problems such as the analysis does not include the aircraft use and maintenance process, the failure mode recognition rate and accuracy are not high, and the recommended measures are imperfect. The quality risk identification and evaluation method proposed in this paper expands the PFMEA method to analyze the quality risks during the use and maintenance of aircraft, maps the Design Failure Mode Effects Analysis (DFMEA) results to the PFMEA analysis through a set of rules to improve the recognition rate and accuracy of failure modes, and integrates and optimizes risk control measures using the tree analysis diagram method. Using the method proposed in this paper to analyze a hydraulic pump circulating heat dissipation pipe in a hydraulic system, the results show that the method proposed in this paper can more comprehensively and accurately analyze the quality risks during aircraft manufacturing, operating, and maintenance, and obtain a more optimized set of quality risk control measures.

**Key words:** aircraft manufacturing; maintenance; risk identification; risk assessment; FMEA; tree analysis diagram

收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-05-13

通信作者: 胡林(1980—), 男, 学士, 高级工程师。E-mail: 1139094431@qq.com

引用格式: 胡林, 胡晓. 一种面向飞机制造和维护的质量风险识别与评估方法[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 90-100.

HU Lin, HU Xiao. A quality risk identification and assessment method for aircraft manufacturing and maintenance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 90-100. (in Chinese)

## 0 引言

飞机作为一个大型集成系统,包含数十万零部件,构成十分复杂,其生产制造及使用维护环节也非常繁琐。若机上任一零部件失效,或飞机设计、制造、装配、维护某个环节出现问题,都有可能导导致飞机出现故障,带来需要维修、任务失败、飞机损伤等后果。

目前航空、航天、汽车、机械、电子等行业广泛采用失效模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis,简称FMEA)方法<sup>[1-2]</sup>进行前期预防<sup>[3-7]</sup>。FMEA被誉为ISO/TS 16949的5大工具之一,我国也制定了GB 7826—1987《系统可靠性分析技术——失效模式和效应分析(FMEA)程序》<sup>[8]</sup>、GJB/Z 1391—2006《故障模式、影响及危害性分析指南》<sup>[9]</sup>等相关标准。

康锐等<sup>[10]</sup>和NASA的研究<sup>[11]</sup>介绍了FMEA技术的详细细节,DFMEA(Design Failure Mode and Effects Analysis)和PFMEA(Process Failure Mode and Effects Analysis)所适用的不同阶段;贾涛等<sup>[12]</sup>在机翼装配中使用PFMEA方法,提升了飞机总装质量;刘卫东等<sup>[13]</sup>设计了一种基于PFMEA方法的计算程序,应用于某型飞机装配工艺过程,获得了较好的效果;周继广<sup>[14]</sup>提出在航空产品PFMEA中引入对操作、生产人员的危害维度分析,使得分析更加全面;Li Zhaojun等<sup>[15]</sup>研究了基于DFMEA方法的产品设计阶段质量风险识别与评估技术;陈政平等<sup>[16]</sup>提出了一种基于费用及发生概率的定性定量相结合的改进风险优先数(Risk Priority Number,简称RPN)方法,使得PFMEA的风险排序更为客观、准确。

上述研究均未充分研讨使用PFMEA方法分析产品使用维护阶段的质量风险和使用DFMEA结果提升PFMEA识别率、准确性的可行性,也未充分探究避免出现建议措施重复或覆盖不全问题的方法。因此,本文基于飞机制造单位业务实际情况,参照PFMEA方法将飞机使用维护工作进行分解和分析,使用设计单位DFMEA结果提升PFMEA的识别率和准确性,构建树形图来分析建议措施覆盖和重复情况,建立一种可以分析、评估和应对飞机制造与使用维护阶段质量风险的方

法,并通过实实验证该方法的正确性及优势。

## 1 PFMEA方法及局限性

### 1.1 FMEA方法

FMEA方法希望在产品设计或生产设计早期发现潜在失效及其影响程度,以提前谋求解决之道,从而避免或降低其发生的可能,FMEA的典型过程如图1所示。

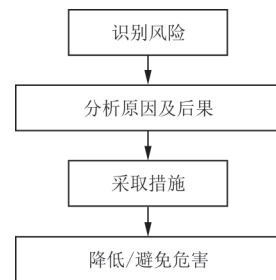


图1 FMEA过程简图

Fig. 1 FMEA process diagram

FMEA根据开展阶段不同,分为设计阶段的设计故障模式影响分析(DFMEA)和生产制造阶段的过程故障模式影响分析(PFMEA)等<sup>[1]</sup>,该方法主要在产品研发的先期质量策划<sup>[17]</sup>工作中应用,其典型的研发流程如图2所示。

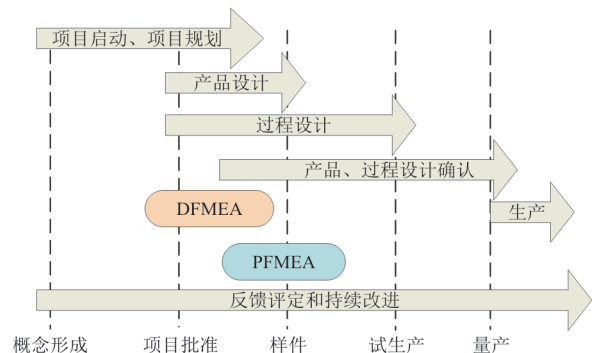


图2 DFMEA/PFMEA在产品先期质量策划(APQP)研发中的开展阶段

Fig. 2 Stage of DFMEA/PFMEA in APQP R&D

#### 1.1.1 DFMEA

DFMEA是指设计师在产品研制时,考虑产品在生产、运输、使用的过程中的各种潜在失效模式以及相关的后果、起因、机理,改善设计弱点,主要针对的是系统和部件,包括主系统、子系统、零件、组件、机构<sup>[18]</sup>,其分析流程如图3所示。

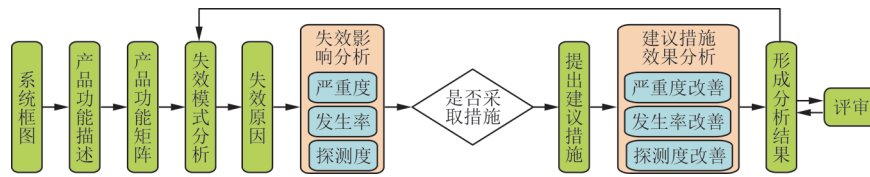


图 3 DFMEA 流程

Fig. 3 DFMEA process

1.1.2 PFMEA

PFMEA 是由负责制造、装配工艺等人员分析产品在生产制造过程中,工艺层面的各种潜在失效模式及其相关的起因、机理及影响,找出管制及

改善方法,主要针对制造过程,包含设备、机器、工具、工作站、生产线、制程、治具等<sup>[19]</sup>,其流程如图 4 所示。

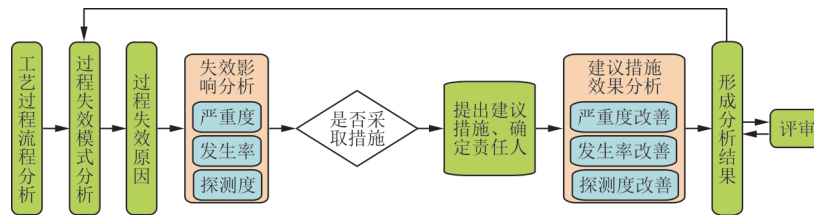


图 4 PFMEA 流程

Fig. 4 PFMEA process

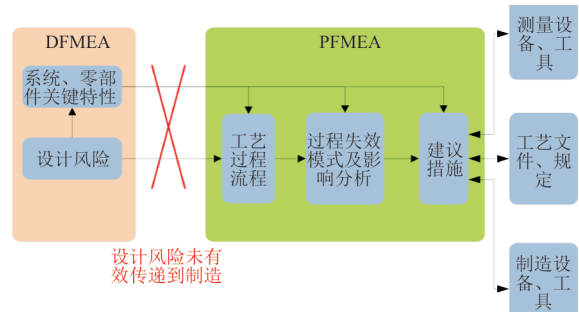
1.2 PFMEA 的局限性

PFMEA 方法主要从零部件的制造、工艺层面进行分析,故可应用于制造阶段的风险识别与评估。但结合我国飞机制造厂工作特点及实际 PFMEA 方法使用情况,使用 PFMEA 方法进行面向飞机制造与维护的质量风险识别与评估时,存在一定的局限。

度等不准确。设计风险传递到 PFMEA 的问题及影响如图 5 所示。

1.2.1 PFMEA 覆盖不全

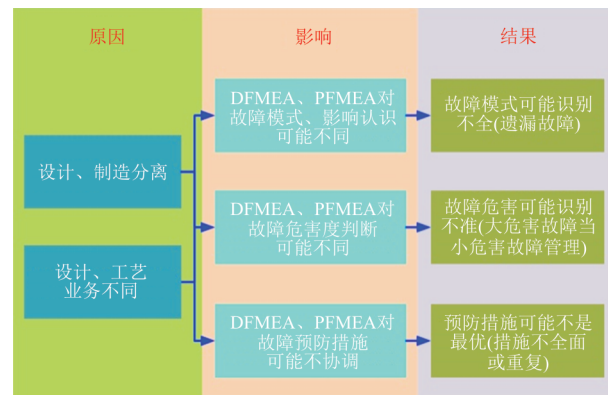
PFMEA 方法侧重于制造阶段的风险识别与评估。但目前我国飞机制造厂不仅进行飞机制造和装配工作,还承担了一段时间内飞机使用维护的工作。故目前的 PFMEA 方法存在维护层面分析不足,不能完全识别出我国飞机制造厂业务范围内全部潜在失效模式的局限性。



(a) PFMEA 与其他要素关联关系

1.2.2 失效模式的识别率、准确性不高

由于我国部分飞机设计单位与制造单位分离、设计与工艺人员业务工作不同等原因,导致 DFMEA、PFMEA 处于割裂状态,设计单位 DFMEA、制造单位 PFMEA 工作“各自为政”。因此,DFMEA 成果不能有效传递给 PFMEA,进而导致 PFMEA 团队进行分析时可能遗漏 DFMEA 已识别出的部分失效模式,对失效危害的评估也可能与 DFMEA 结果存在偏差。Niu Yumei<sup>[20]</sup>指出 PFMEA 会受分析人员主观影响,可能导致严重



(b) DFMEA 与 PFMEA 割裂

图 5 设计风险传递到 PFMEA 的问题及影响

Fig. 5 Problems and influence of design risk transfer to PFMEA

1.2.3 建议措施不完善

DFMEA、PFMEA 各自分别给出针对失效模式的建议措施,缺乏协调,难以避免建议措施重复或疏漏。目前也缺少系统性分析建议措施覆盖性、重复性的方法。

2 面向飞机制造和维护的质量风险识别与评估方法

本文所述面向飞机制造和维护的质量风险识别与评估方法,是分析飞机在制造厂制造阶段中制造、工艺、使用及维护层面潜在失效及其失效原因,并对这些失效进行评估,对重要(危害较大)的失效模式,制定建议措施,减少或避免失效发生的方法。为了达到目标,必须解决 PFMEA 应用存在的局限性。

2.1 PFMEA 优化方案

飞机使用维护过程典型工序(过程流程图)与飞机零部件生产制造过程典型工艺工序类似,如图 6 所示,因此可以参照 PFMEA 将生产制造过程分解并开展分析的方法,对使用维护进行分解和分析,即将使用维护过程作为工序纳入 PFMEA 中,得到包含生产制造和使用维护全过程的 PFMEA 结果。

为了确保分析全面、准确,在对使用维护过程风险进行分析时,需结合设计师对飞机使用环境、工况、正常状态的定义,检查工作的目的、内容和必要性、工作步骤等,工艺文件对使用维护工序、工具设备、物料和实际环境等需求考虑;然后针对性制定应对措施建议,实现风险控制。拓展 PFMEA 范围方案如图 7 所示。

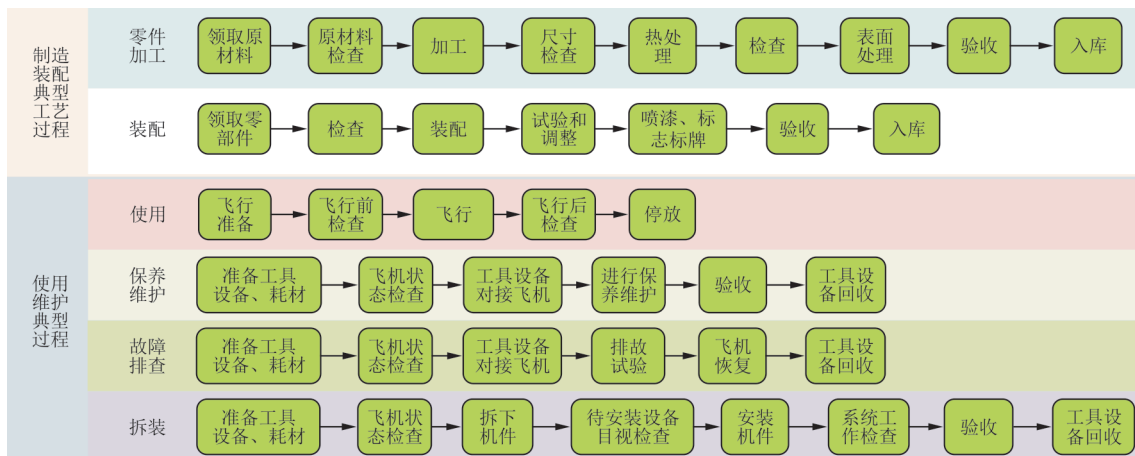


图 6 制造装配与使用维护典型工序

Fig. 6 Typical process of manufacture, assembly, usage and maintenance

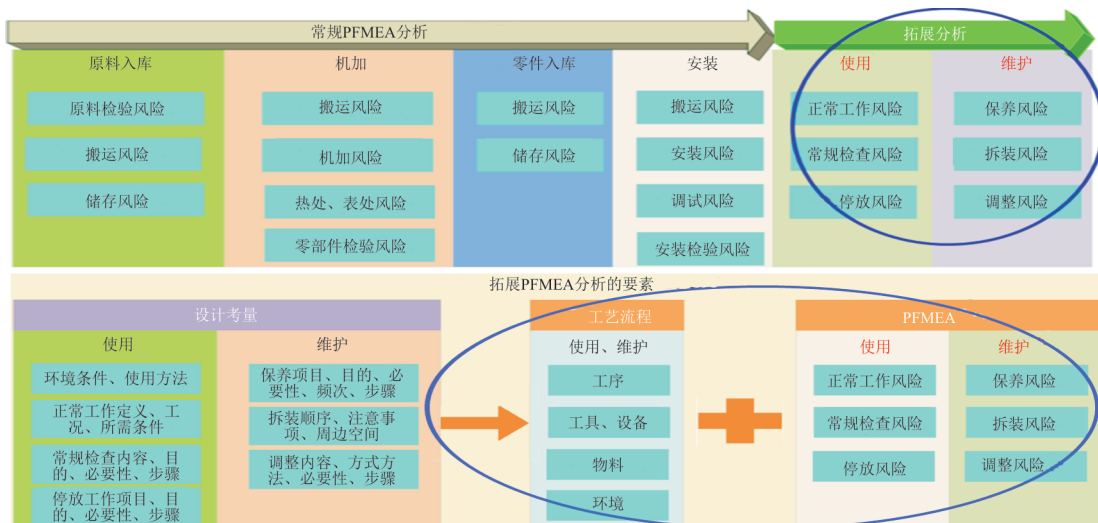


图 7 拓展 PFMEA 范围方案

Fig. 7 Expanding the scope of PFMEA

## 2.2 提升失效识别率、准确性的方案

为了提升失效模式识别率、准确性,采用将 DFMEA 结果按一定规则映射入 PFMEA 中,由 DFMEA 结果指导、修订 PFMEA 过程。

按 FMEA 方法,PFMEA 是将组件或零部件原材料、制造、装配的潜在失效情况作为失效模式进行分析,这些失效模式的失效影响是该组件或零部件功能丧失或性能降级;DFMEA 则是将组件或零部件功能或性能潜在失效情况(即功能丧失或性能降级)作为失效模式,组件或零部件原材料、制造、装配、使用、维护等潜在失效作为失效原因进行分析的,这些失效模式的失效影响是飞机(子)系统功能或性能层面。可见 DFMEA 比 PFMEA 高一个层次,故 DFMEA 失效模式的失效原因可作为 PFMEA 失效模式的失效影响使用。本文基于此理论制定映射规则基本内容。

为了降低分析的复杂程度和减少工作量,进

行 PFMEA 时,限定只分析可能导致出现 DFMEA 重要失效模式的制造和使用维护风险,即只对 DFMEA 重要失效模式进行映射。最终形成以下映射规则以补充完善 PFMEA 方法(其示例如图 8 所示)。

1) 若某个 DFMEA 重要失效模式的失效原因在某个 PFMEA 失效模式的失效影响中被找到,则认为该 DFMEA 重要失效模式已被识别,视 DFMEA 失效模式与 PFMEA 失效模式为对应关系;

2) 若某个 DFMEA 重要失效模式未被识别出,则将该 DFMEA 失效模式的失效原因作为一项 PFMEA 失效模式的失效影响,分析可能导致该失效影响的失效模式;

3) 将对应的 DFMEA 重要失效模式严重度与原 PFMEA 失效模式严重度进行对比,选择较大者作为 PFMEA 失效模式新严重度。

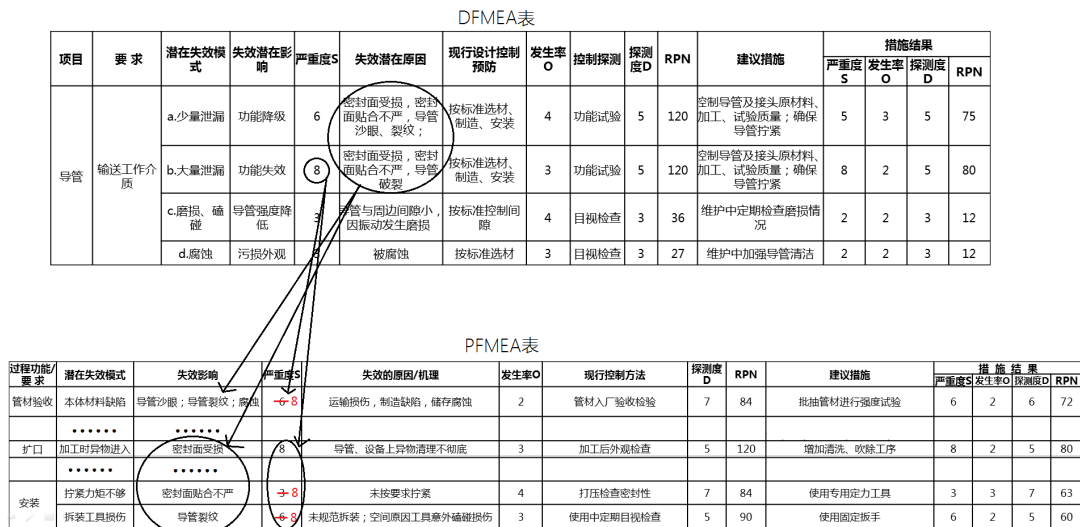


图 8 DFMEA 失效原因和严重度映射应用示例

Fig. 8 Application example of DFMEA failure cause and severity mapping

## 2.3 优化建议措施方案

为了获得最优化的建议措施集合,采用建议措施优化整合和进一步进行覆盖性、重复性分析的两步分析方法,以达到对建议措施去除冗余,查漏补缺的目的。

### 2.3.1 建议措施的优化整合

将 PFMEA 建议措施与 DFMEA 建议措施进行对比,PFMEA 措施应覆盖所有 DFMEA 建议措

施,否则将该 DFMEA 建议措施纳入对应的 PFMEA 建议措施中进行分析,以实现将 DFMEA 建议措施整合到 PFMEA 得到的建议措施中去的

### 2.3.2 建议措施覆盖性和重复性分析

使用一种逆向构建的树形图直观地展示建议措施覆盖性和重复性,可以轻松实现将建议措施进一步优化归并的目标。树形图的构建过程和示例分别如图 9~图 10 所示。

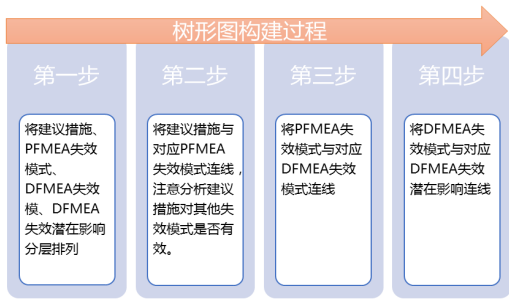


图 9 树形图的构建过程

Fig. 9 Construction process of tree analysis diagram

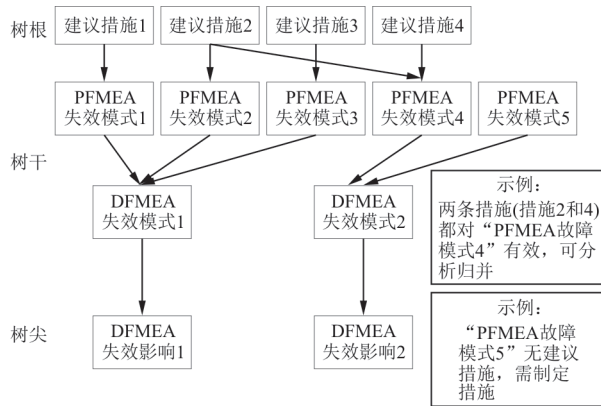


图 10 树形图构建的示例

Fig. 10 Example of a tree construction

经过构建树形图分析,归并或补充相关建议措施后,获得简洁的建议措施合集。

### 2.4 风险识别与评估方法具体方案

本文所述面向飞机制造和使用维护的风险识别与评估方法主要步骤如图 11 所示,具体步骤包括:

STEP 1:通过 DFMEA 方法从产品功能、组成架构出发,分析各零部件的所有潜在失效模式、失效原因和风险优先数(风险优先数=严重度×发生度×探测度)等。依据风险优先数、严重度(S)等判定是否为重要失效模式。

STEP 2:按需将使用维护项目作为一个或多个工序纳入 PFMEA 中,用 PFMEA 方法从人、机、料、法、环、测 6 方面分析所有工序环节潜在失效模式、失效原因、风险优先数等,制定可采用的制造、使用维护建议措施。

STEP 3:在 PFMEA 后,按规则将 DFMEA 重要失效模式的分析映射入 PFMEA 中进行修正,完善分析。

STEP 4:按规则将 PFMEA 建议措施与 DFMEA 建议措施进行优化整合,形成完整的 PFMEA 建议措施。

STEP 5:按风险优先数、严重度等判定 PFMEA 重要失效模式。对重要失效模式建立逆向树形分析图,用分析图验证建议措施对重要失效模式的覆盖性和重复性,完善建议措施,得到最终的风险识别与评估结果。

STEP 6:分析重要失效模式建议措施,综合考虑风险优先数、S、检验难度高低、相关故障演变速度快慢(如突发、逐渐发展等)、操作便利与否等因素确定关键控制建议措施,最后将建议措施落实到生产制造、使用维护中去,以避免发生重要失效或降低识别出的重要失效风险发生的几率。



图 11 风险识别与评估方法具体步骤

Fig. 11 Specific steps of risk identification and assessment method

### 3 面向飞机制造和维护的风险识别与评估方法应用案例

#### 3.1 分析对象

以某液压系统一根液压泵循环散热导管为例进行分析。液压泵流出散热油先经过油滤过滤，然后经散热器进行散热，再流回液压油箱，最后供给液压泵。该循环散热导管的作用是将液压泵流出的散热油输送到油滤。该导管接口为74°扩口连接形式，其安装模型如图12所示。

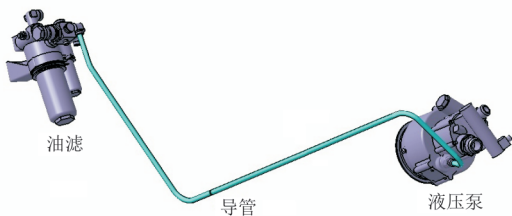


图12 液压泵循环散热导管安装模型  
Fig. 12 Installation model of circulating heat dissipating duct of hydraulic pump

该导管发生渗漏可能导致单个液压系统液压油漏完，致使该液压系统失效，其原理图如图13所示。

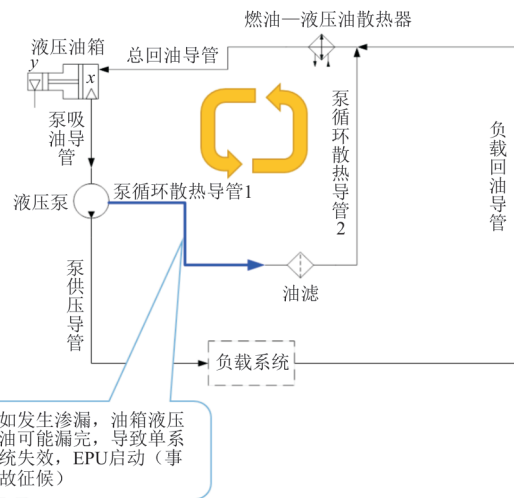


图13 液压泵循环散热导管失效影响  
Fig. 13 Effect of circulation heat dissipation duct failure of hydraulic pump

#### 3.2 DFMEA方法

按照DFMEA方法，分析得到该导管设计阶段的失效模式、原因及影响等情况，形成DFMEA表。按重要模式的判断标准确定重要失效模式（判断标准拟为风险优先数 $\geq 75$ 或严重度(S) $\geq 7$ ，该值可按实际需求确定），示例如图14所示。



项目	要求	潜在失效模式	失效潜在影响	严重度S	失效潜在原因	现行设计控制预防	发生率O	控制探测	探测度D	RPN	建议措施	措施结果				
												严重度S	发生率O	探测度D	RPN	
导管	输送工作介质	a.少量泄漏	功能降级	6	密封面受损，密封面贴合不严，导管沙眼、裂纹；	按标准选材、制造、安装	4	功能试验	5	120	控制导管及接头原材料、加工、试验质量；确保导管拧紧	5	3	5	75	重要失效
		b.大量泄漏	功能失效	8	密封面受损，密封面贴合不严，导管破裂	按标准选材、制造、安装	3	功能试验	5	120	控制导管及接头原材料、加工、试验质量；确保导管拧紧；拆装部位首次飞行后专项检查；空司紧张区域，双人岗位，一人拧紧，另一人确认是否拧紧	8	2	5	80	
		c.磨损、磕碰	导管强度降低	3	导管与周边间隙小，因振动发生磨损	按标准控制间隙	4	目视检查	3	36	维护中定期检查磨损情况	2	2	3	12	
		d.腐蚀	污损外观	3	被腐蚀	按标准选材	3	目视检查	3	27	维护中加强导管清洁	2	2	3	12	

图14 DFMEA结果示例  
Fig. 14 Example of DFMEA results

#### 3.3 PFMEA方法

将使用、拆卸、安装等作为工序纳入PFMEA方法，按照PFMEA方法，分析得到该导管在制造、验收、使用、拆卸、安装等各阶段工艺、工序的失效

模式、原因及影响等情况，形成PFMEA表。确定初步的重要失效模式（判断标准拟为风险优先数 $\geq 75$ 或严重度(S) $\geq 7$ ，该值可按实际需求确定，可不与DFMEA判断标准一致），示例如图15所示。



图 15 PFMEA 结果示例  
Fig. 15 Example of PFMEA results

### 3.4 失效模式、危害和建议措施修正

按照映射规则将 DFMEA 结果中重要失效模式的失效原因和严重度映射到 PFMEA 表

格, 同时将 DFMEA 和 PFMEA 建议措施进行整合, 更新 PFMEA 表格, 修正结果示例如图 16 所示。



图 16 失效模式、危害和建议措施修正结果示例  
Fig. 16 Example of failure modes, severity and recommended measure correction results



### 3.5 建议措施覆盖性和重复性分析

分析和归并建议措施,实现建议措施的优化,示例如图 17 所示。

按照树形图构造方法,建立建议措施树形图,

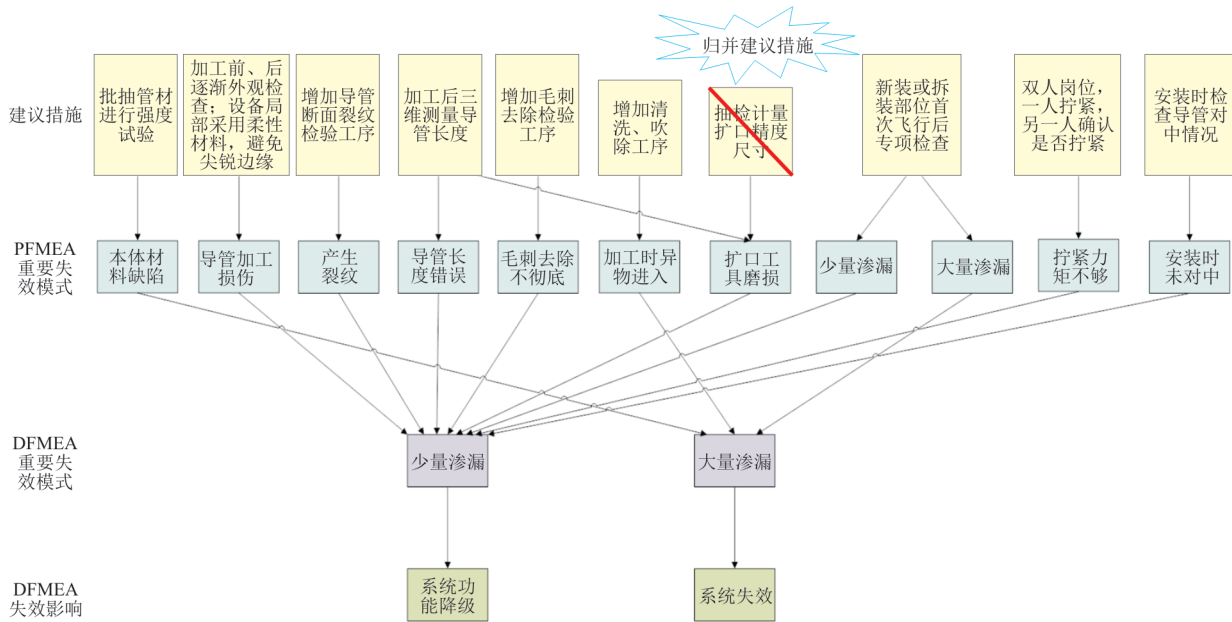


图 17 建议措施树形图分析结果示例

Fig. 17 Example of analysis result of recommended measure tree analysis diagram

### 3.6 关键措施确定

PFMEA 表格,形成最终结果。依据判断标准确定重要失效模式,将其建议措施作为质量风险控制关键措施,示例如图 18 所示。

依据树形图分析结果,归并建议措施,更新

DFMEA分析 → PFMEA分析 → 失效模式及危害修正 → 重要失效建议措施修正 → 建议措施覆盖性和重复性分析 → 关键措施确定													
过程功能/要求	潜在失效模式	失效影响	严重度	失效的原因/机理	可能性	现行控制方法	探测度	RPN	关键措施 建议措施	措施结果			
										严重度	发生率	探测度	RPN
管材验收	本体材料缺陷	导管沙眼; 导管裂纹; 腐蚀	8	运输损伤, 制造缺陷, 储存腐蚀	2	管材厂验收检验	7	112	批抽管材进行强度试验	8	2	6	96
弯管	导管加工损伤	导管划伤	6	加工设备有尖锐且坚硬部位接触导管; 弯曲加工时有异物进入	3	加工后外观检查	7	126	加工前、后逐渐外观检查; 设备局部采用柔性材料, 避免尖锐边缘	6	3	6	108
	产生裂纹	密封面受损	6	密封操作不正确	3	依靠操作人员自查	7	126	增加导管断面裂纹检验工序	6	3	6	108
锯管	毛刺去除不彻底	密封面受损	6	去毛刺工艺和操作不正确	3	依靠操作人员自查	7	126	增加毛刺去除检验工序	6	3	6	108
	导管长度错误	密封面贴合不严	6	导管长度余量不够	3	加工前长度测量; 安装前确认密封件贴合情况	5	90	加工后三维测量导管长度	6	3	4	72
弯管	导管弯曲后回弹	密封面贴合不严	6	弯曲量不够	3	增加预弯曲量, 补偿回弹	7	126	加工后三维测量导管外形	6	3	4	72
扩口	加工时异物进入	密封面受损	8	导管、设备上异物清理不彻底	3	加工后外观检查	5	120	增加清洗、吹除工序	8	2	5	80
	扩口工具磨损	密封面尺寸超差	5	工具磨损	4	工具定期计量	5	100	抽检计量扩口精度尺寸 加工后三维测量导管外形	5	3	5	75
清洗	管内有异物	污染系统	2	清洗不彻底	4	目视检查	7	56	使用孔探仪检查导管内部	2	4	5	40
验收	试验压力不够	不能充分筛选缺陷导管	4	压力测点距离测试导管较远	4		5	80	压力测点布置在测试导管进口处	4	4	4	64
使用	少量渗漏	系统功能降级	6	长期飞行振动导致松动	4	打压检查密封性	6	144	新装或拆装部位首次飞行后专项检查	6	4	5	120
	大量渗漏	系统失效	8	长期飞行振动导致松动	3	打压检查密封性	6	144	新装或拆装部位首次飞行后专项检查	8	3	5	120
	意外损伤	导管强度降低	3	周边维护或检查时意外碰撞	3	定期目视检查	6	54					
	磨损	导管强度降低	3	与周边间隙小, 长期振动导致磨损	4	定期目视检查	6	72					
拆卸	多余物进入系统	污染系统	4	断开导管后对断开部位保护不及时	3	强化理论培训	7	84	拆卸时检查导管保护情况	4	3	5	60
	多余物进入系统	污染系统	4	新导管安全前未清洁或清洁不彻底	3	强化理论培训	7	84	安装时检查导管清洁情况	4	3	5	60
安装	拧紧力矩不够	密封面贴合不严	6	未按要求进行	4	打压检查密封性	7	168	双工人操作, 一人拧紧, 另一人确认是否拧紧	6	3	7	126
	安装时未对中	密封面贴合不严	6	强迫装配	3	打压检查密封性	7	126	安装时检查导管对中情况	6	3	6	108
拆装	拆装工具损伤	导管裂纹	6	未规范拆装; 空间原因工具意外碰撞损伤	3	使用中定期目视检查	5	90	使用固定扳手	6	2	5	60

图 18 确定关键措施示例

Fig. 18 Identify examples of key measures

### 3.7 分析结果的应用

本文方法分析结果的应用方式主要为按确定

的关键措施更新工艺文件、规定、工序、工装、设备,以实现控制相关风险的目的,示例如图 19 所示。

阶段	失效模式	现有控制措施	建议控制措施	完善工艺文件	列为控制重点
管材验收	本体材料缺陷	针对原材料的控制措施为对入厂管材进行检验	批抽管材进行硬度试验	√	√检验验收项目
弯管	导管加工损伤	工人下料前、加工后目视检查	加工前、后逐渐外观检查;设备局部采用柔性材料,避免尖锐边缘	-	√检验验收项目
锯管	产生裂纹	工人下料前、加工后目视检查	增加导管断面裂纹检验工序	-	√检验验收项目
	毛刺去除不彻底	工人下料前、加工后目视检查	增加毛刺去除检验工序	√	√检验验收项目
扩口	加工时异物进入	工人加工后目视检查(必要时可用4倍~8倍放大镜)	增加清洗、吹除工序	√	√检验验收项目
	扩口工具磨损	人工游标卡尺、量规检查密封面尺寸	加工后三维测量导管外形	√	√检验验收项目
使用	少量渗漏	打压检查密封性	新装或拆装部位首次飞行后专项检查	√	√检验验收项目
	大量渗漏	打压检查密封性	新装或拆装部位首次飞行后专项检查	√	√检验验收项目
安装	拧紧力矩不够	打压检查密封性	双工人操作,一人拧紧,另一人确认是否拧紧	√	-
	安装时未对中	打压检查密封性	安装时检查导管对中情况	√	-

图 19 关键措施的应用情况示例

Fig. 19 Example of the application of key measures

## 4 结 论

1) PFMEA 方法可以用于分析产品使用维护阶段的质量风险,DFMEA 方法的分析结果可以用于提升 PFMEA 的识别率和准确性,树形分析图方法可以整合优化 PFMEA 中的建议措施,具有简单、直观的优点。

2) 与常规 PFMEA 方法相比,本文提出的质量风险识别与评估方法的分析范围可以覆盖飞机的制造及使用维护阶段,能够识别出更多的失效模式,对危害的评估结果更准确,提出的建议措施集合更简洁。

### 参 考 文 献

[1] Department of Defense. Procedures for performing a failure mode effects and critically analysis: MIL-STD-1629A[S]. Washington, D. C. : Department of Defense, 1980.

[2] SAE. Potential failure mode and effects analysis in manufacturing and assembly processes (Process FMEA) : SAE J1739[S]. Washington, D. C. : SAE, 2009.

[3] 上官云,周飞,史兴宽. 基于 PFMECA 的装配过程关键工序识别[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(3): 38-52. SHANGGUAN Yun, ZHOU Fei, SHI Xingkuan. Identification for key process of assembly process based on PFMECA [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology,

2016, 52(3): 38-52. (in Chinese)

[4] 李福秋,史进朝,邵德生. 航天产品工艺 FMEA 技术及其应用[J]. 质量与可靠性, 2011(2): 29-33. LI Fuqiu, SHI Jinzhao, SHAO Desheng. The aviation product process of FMEA technology and its application[J]. Quality and Reliability, 2011(2): 29-33. (in Chinese)

[5] GAVAL V R, IYER P B. Application of DFMEA in metal to plastic replacements in automotive industry[C]// 2nd International Conference on Computer, Electronics, Mechanical and Aerospace Engineering. Phuket, Thailand: [s. n.], 2014: 21-25.

[6] HUANG J Y. Discussion on the analysis and application of FMEA[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2007, 35: 37-41.

[7] Doc88. Failure mode and effects analysis (FMEA) : a guide for continuous improvement for the semi-conductor equipment industry [EB/OL]. (2022-10-24) [2023-03-20]. https://www.doc88.com/p-95729721740130.

[8] 国家标准局. 系统可靠性分析技术——失效模式和效应分析(FMEA)程序:GB 7826—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987. National Bureau of Standards. Analysis techniques for system reliability—procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) : GB 7826—1987 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)

[9] 中国人民解放军总装备部. 故障模式、影响及危害性分析指南: GJB/Z 1391—2006[S]. 北京: 中国人民解放军总装

- 备部, 2006.  
The General Equipment Department, PLA. Guide to failure mode, effects and criticality analysis: GJB/Z 1391—2006 [S]. Beijing: The General Equipment Department, PLA, 2006. (in Chinese)
- [10] 康锐, 石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 88-101.  
KANG Rui, SHI Rongde. FMECA technique and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 88-101. (in Chinese)
- [11] NASA. Process failure modes and effects analysis (PFMEA) training [EB/OL]. (2003-11-24) [2023-03-20]. <http://process.nasa.gov/documents/pfmea.pdf>.
- [12] 贾涛, 蒋德成, 茹博. 基于 PFMEA 的飞机总体装配质量提升研究与实践[J]. 航空标准化与质量, 2022(1): 27-33.  
JIA Tao, JIANG Decheng, RU Bo. Research and practice of aircraft overall assembly quality improvement based on PFMEA [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2022 (1): 27-33. (in Chinese)
- [13] 刘卫东, 胡坤, 郑慧萌. 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): 1485-1493.  
LIU Weidong, HU Kun, ZHENG Huimeng. PFMEA technology of multi-varieties and small batch customization mode [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016 (22): 1485-1493. (in Chinese)
- [14] 周继广. 基于航空产品研制全过程的 PFMEA 应用研究[J]. 教练机, 2020(4): 64-68.  
ZHOU Jiguang. PFMEA applied research in the whole process of aviation development[J]. Trainer, 2020(4): 64-68. (in Chinese)
- [15] LI Zhaojun, MOBIN M. A DFMEA-based reliability prediction approach in early product design[C]// 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium. USA: IEEE, 2018: 115-121.
- [16] 陈政平, 付桂翠, 赵幼虎. 改进的风险优先数(RPN)分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1395-1399.  
CHEN Zhengping, FU Guicui, ZHAO Youhu. Improved analysis method of risk priority number [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (11): 1395-1399. (in Chinese)
- [17] 马静静. 新产品开发供方 APQP 过程管理[J]. 汽车工程师, 2016(2): 20-23.  
MA Jingjing. Supplier APQP management in new product development [J]. Auto Engineer, 2016(2): 20-23. (in Chinese)
- [18] PORTER A. Design failure mode effects analysis (DFMEA) [J]. Accelerated Testing and Validation, 2004, 119: 77-86.
- [19] JOHNSON K G, KHAN M K. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1/3): 348-356.
- [20] NIU Yumei. The optimization of RPN criticality analysis method in FMECA [C]// International Conference on Ap-perceiving Computing and Intelligence Analysis (ICA-CIA2009). Chengdu, China: IEEE, 2009: 166-170.

(编辑: 马文静)