

# 基于工艺 FMEA 的连接支架风险管理

禹蓁仪, 刘 磊, 徐书茂, 刘兴民

(中国原子能科学研究院, 北京 102400)

**摘 要** 连接支架作为系统的承载结构, 既要承担系统的重量, 又要为系统内其他设备提供支撑, 并在各种载荷环境中承受载荷, 一旦失效将会导致系统功能的丧失, 因此有必要对其制造过程进行风险管控。本文基于工艺 FMEA 方法进行连接支架风险管理, 列出失效模式清单, 并对每个失效模式进行定量分析, 通过严酷度、失效发生概率、可检测度、风险优序数来对制造过程中可能发生的风险进行评估, 制定风险管理措施, 以期对相关人员进行借鉴。

**关键词** 连接支架; 风险管理; 工艺 FMEA; 风险优序数

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.002

## 0 引言

在航空航天、核工业、船舶工业等大型机械制造领域, 项目产品在生产过程中往往会面临系统复杂、新技术开发、生产工艺优化等问题, 在任何一个环节出现问题都可能带来重大损失<sup>[1-2]</sup>。《质量管理体系要求》(GJB 9001C-2017) 提出基于风险的思维是实现质量管理体系有效性的基础, 指出组织需策划和实施应对风险的措施, 这样有利于提高质量管理体系的有效性、获得改进结果以及防止不利影响。因此, 风险管理成为项目质量管理的重要内容之一<sup>[3]</sup>。2023 年宇航产品质量问题发生原因统计中, 工艺问题占比约 20%<sup>[4]</sup>。航天产品工艺 FMEA 技术及应用研究中提到航天型号使用过程中发生失效的一部分原因是工艺设计、实施、更改、控制不良<sup>[5]</sup>。因此, 对产品生产制造过程进行风险管理十分必要。

连接支架是系统的承载结构, 面临着新环境、新材料等考验, 制造过程中发生质量风险的可能性较大。失效模式及影响分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) 是质量管理方法中的一种预防、控制质量风险的方法<sup>[6]</sup>。FMEA 方法在产品的设计过程中应用较多, 针对制造工艺过程的 FMEA 应用较少<sup>[7]</sup>。本文以连接支架为例, 探索基于工艺 FMEA 的制造风险管理。

## 1 基于 FMEA 风险管理的实施原理

工艺失效模式与影响分析 (FMEA) 作为工艺设计过程中的重要环节, 与工艺设计工作并行开展。该分析方法通过系统地识别工艺过程中潜在的失效模式, 并对这些失效模式进行定性与定量评估, 从而实现

对工艺风险的科学评估。在评估过程中, 采用风险优先数 (Risk Priority Number, RPN) 作为关键指标。该指标由严酷度 (Severity, S)、故障发生概率 (Occurrence, O) 和可检测度 (Detectability, D) 三个维度的综合评分计算得出。基于 RPN 值的排序结果, 可以明确工艺风险等级, 进而确定需要重点防控的风险点。通过这种前瞻性的分析方法, 能够预先制定有效的防控措施, 从而规避潜在风险事件的发生, 确保工艺设计的可靠性和安全性<sup>[8]</sup>。工艺 FMEA 实施流程如图 1 所示。

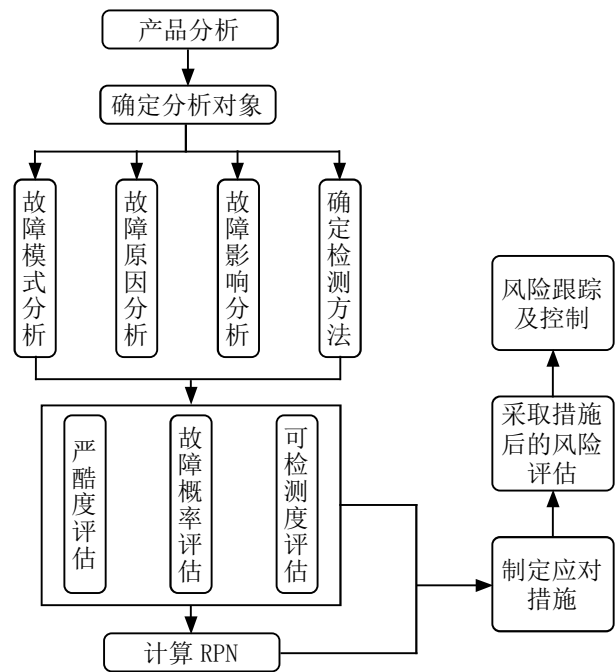


图 1 FMEA 实施流程图

**作者简介:** 禹蓁仪 (1993-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 产品质量管理和风险管理。

1. 进行产品分析,明确产品结构、功能及基本要求。  
2. 确定分析对象:在开展失效模式及影响分析(FMEA)时,针对制造工艺复杂、工序繁多的产品,若对所有工艺流程逐一进行分析,将导致工作量显著增加,风险管理难度大幅提升,进而影响风险管控的有效性。为确保分析工作的针对性和实效性,建议采取重点突出的分析策略。具体而言,应优先选择以下关键环节进行FMEA:形成关键/重要特性难度较大的工艺环节、新引入的工艺技术以及重要设备的装配工艺等。这种聚焦关键点的分析方法,既能确保风险管控的精准性,又能有效简化管理流程,实现资源的最优配置。

3. 失效分析:失效分析在产品分析的基础上进行。技术人员结合自身经验运用头脑风暴、专家讨论等方法将影响任务、安全的事项列出,确定失效模式,然后对其进行失效影响分析。失效影响分析需考虑失效对本工艺的影响、失效对后续工艺的影响、失效对产品的影响。

4. 风险评估:根据项目特点确定严酷度、失效概率、可检测度的评分准则,对失效模式进行评估,给出失效模式的严酷度、失效概率、可检测度。(1)严酷度是产品加工、装配过程中失效模式对产品影响严重程度的度量,根据最终可能出现的人员伤亡、经济损失、进度影响的程度来确定。(2)失效概率是产品加工、总装过程中某一个失效模式发生的可能性的度量,根据失效发生可能性的大小来确定。(3)可检测度是产品加工、装配过程中失效模式在已确定的检测手段和控制措施下被检测出来的可能性度量,根据检测难度评分。风险优序数是严酷度、失效发生概率和可检测度的乘积,即:

$$RPN=S \times O \times D \quad (1)$$

式(1)中,RPN是对工艺风险等级评价,RPN值越高代表风险等级越高。一般根据RPN值排序确定需重点防御风险,但对于单项评估参数高的也需重点防御。

5. 根据识别出来的风险及风险评估结果制定风险应对措施。

6. 确定重点风险并由质量管理人员及工艺人员进行风险跟踪及管控。

## 2 连接支架工艺 FMEA

### 2.1 产品分析

连接支架作为系统的重要组成部分,其主要功能是为各类设备提供可靠的安装接口,并承担相应的任务载荷。该支架采用典型的“球一杆”焊接桁架结构设计,每个节点球体可连接2根至9根结构杆件,整体呈现细高锥形的空间布局。从结构组成来看,连接支架由上接口、下接口、结构杆件及节点接头等部件构成,所有构件均选用316H不锈钢材料精密加工而成,并通过焊接工艺形成整体结构。在服役周期内,连接支架必须持续保持足够的结构强度、刚度以及几何精度,以确保其功能性和可靠性。

### 2.2 确定分析对象

连接支架制造过程主要包含零件加工和焊接组装。

零件按外形可分为节点类零件和管类零件。经分析与评估零部件加工过程无新工艺,加工技术难度相对较小,因此不对零部件加工工艺进行FMEA。

连接支架共有三种焊接接头:“管—管”对接接头、“板—管”单侧角接接头、“板—管”双侧角接接头。连接支架焊缝的质量直接影响连接支架的强度。根据设计要求和控制的性能特性确定焊缝等级是连接支架的工艺关键特性。连接支架的焊接是形成关键特性难度较大的工艺,因此选取焊接为FMEA分析对象。

### 2.3 参数评分准则定义

#### 2.3.1 严酷度评分准则

从人员、经费、进度等三个方面的影响,将严酷度等级分为可忽略的、轻度的、中等的、严重的、灾难的5个等级(见表1)。

#### 2.3.2 失效发生概率评分准则

根据失效发生可能性的大小将失效发生率等级分为极低、低、中等、高、极高5个等级(见表2)。

#### 2.3.3 可检测度评分准则

可检测度是产品加工、装配过程中失效模式在已

表1 严酷度评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	可忽略的	轻度的	中等的	严重的	灾难的
描述	人员无影响,经济损失可忽略不计,不影响进度和质量	人员轻度不适,损失1万元以下,进度推迟3天	人员轻伤,损失1万元到10万元,进度推迟7天	人员重伤,损失10万到100万,进度推迟7天到1个月	人员死亡,设施损坏100万元以上,推迟进度1个月以上

表 2 失效发生概率评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	极低	低	中等	高	极高
描述	几乎不发生	很少发生	偶尔发生	经常发生	持续发生

确定的检测手段和控制措施下被检测出来的可能性度量,根据检测难度将可检测度等级分为肯定、高可能、中可能、低可能、几乎不可能 5 个等级(见表 3)。

2.4 失效模式分析及风险评估

识别出连接支架焊接可能发生的潜在风险,分析失效模式产生的影响,并依据 2.3 参数评分准则定义进行风险评估,最后填写 FMEA 表格(见表 4)。

3 连接支架风险管理

3.1 风险应对措施制定

经 FMEA 可知,连接支架焊接的失效模式有两种:焊点有裂纹、未焊透、有缺陷;支架焊接变形。针对两种失效模式分别制定应对措施。

预防焊点有裂纹、未焊透、有缺陷的应对措施是:制定详细的焊接工艺规程,并组织专业技术人员进行严格评审;开展规范的焊接工艺评定工作,以验证工

艺参数的合理性。在具体实施过程中,需按照连接支架全焊接周期的首、中、末三个阶段,分别完成各尺寸 3 个见证件的焊接作业,且必须确保见证件的焊接条件(包括操作人员、设备状态、环境参数及工艺参数)与当日实际生产条件完全一致;所有焊接件需经过射线探伤检测,并对局部试验件进行力学性能测试,以全面验证焊接质量。

2. 预防支架焊接变形的应对措施是:制定工艺规程、对工艺规程进行评审;增加预留收缩量;焊接过程中严格按照焊接顺序进行。

3.2 重点防御风险识别

在风险管理过程中,重点防御风险的识别主要依据风险优先数(RPN)排序结果进行判定。根据项目特性,将 RPN 临界值设定为 27(即严重度 S=3、发生频度 O=3、探测度 D=3 的乘积)。此外,为全面管控高风险项目,即

表 3 可检测度评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	肯定	高可能	中等可能	低可能	几乎不可能
描述	现行方法肯定可以检测或几乎肯定检测出	现行方法很有可能检测出	现行方法基本上可以检测出	现行方法较小机会可以检测	无法检测

表 4 连接支架工艺 FMEA 表

标识号	工艺名称	工艺功能、要求	失效模式	失效原因	失效影响	严酷度	发生概率	可检测度	风险优序数
01-01	3 钎焊(自动焊接)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
01-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3
02-01	5 钎焊(填充盖面焊)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
02-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3

续表 4

标识号	工艺名称	工艺功能、要求	失效模式	失效原因	失效影响	严酷度	发生概率	可检测度	风险优序数
03-01	7 钎焊 (焊安装板)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
03-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3
04-01	27 钎焊 (焊接上层零件)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
04-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3

使 RPN 值未达临界标准,但单项评估参数中严重度  $S \geq 4$ 、发生频度  $O \geq 5$  或探测度  $D \geq 5$  的风险项目,同样被列为重点防御对象。通过失效模式与影响分析(FMEA)评估发现,失效模式 01-01、02-01、03-01、04-01 的 RPN 值均为 20 ( $S=5$ 、 $O=2$ 、 $D=2$ ),虽然其 RPN 值低于临界标准,但由于严重度  $S$  达到 5 ( $\geq 4$ ),因此仍被确认为需要重点防御的风险项目。这一判定标准既考虑了风险的综合评估结果,又兼顾了单项风险指标的特殊性,确保风险管控的全面性和有效性。

### 3.3 风险跟踪及控制

为确保风险管控措施的有效实施,质量管理部门需建立完善的风险跟踪机制,对已识别的风险进行全过程监控。在制造环节启动前,必须组织技术交底会议,向工艺操作人员详细说明风险控制要点。在生产过程中,操作人员须严格遵循工艺文件要求执行作业,每道工序完成后必须进行质量检测并完整记录检测数据,经确认合格后方可转入后续工序。针对重点防控风险,应将其纳入专项质量计划实施重点管理,工艺操作人员和质量管理人員需将相关工序设定为质量见证点,实施重点监控并留存见证记录。通过建立多层次、全流程的质量管控体系,确保风险始终处于受控状态。

## 4 结束语

本研究基于项目特性,科学界定了评估连接支架制造风险的三个关键评价维度:严酷度、失效发生概率及可检测度。选取连接支架焊接工艺过程作为具体分析对象,采用定性与定量相结合的分析方法,系统

识别出焊接过程中存在的主要风险因素,包括焊点裂纹、未焊透、焊接缺陷以及支架焊接变形等问题。通过风险优序数计算及三维度综合评价分析,进一步明确了焊点裂纹、未焊透和焊接缺陷为需要重点防控的核心风险。基于上述分析结果,制定了针对性的风险管理方案,通过实施有效的风险管控措施,确保制造过程中的各类风险均处于可控范围之内。该研究旨在为连接支架制造工艺的风险控制提供实施路径参考。

### 参考文献:

- [1] 程大林,田玉蓉,司群英,等.航天项目研制风险识别与分析探索[J].中国电子科学研究院学报,2019,14(02):46-150.
- [2] 马骥,唐雷,梁孝彬.航天装备制造质量风险分析方法[J].装备制造技术,2019(06):222-224.
- [3] 质量管理体系要求(GJB 9001C-2017)[S].北京:中央军委装备发展部,2017-05-18.
- [4] 杨之浩.风云四号微波星技术风险识别与控制的思考与实践[J].上海航天,2025,42(01):29-37,67.
- [5] 李福秋.航天产品工艺FMEA技术及其应用[J].质量与可靠性,2011(02):29-33.
- [6] 陈红,孙志礼,王冬梅.工艺FMEA在机械零部件加工过程的应用[J].制造业信息化,2010(08):80-81.
- [7] 蒋志广,易旺民,张廷磊.卫星总装工艺FMEA应用初步研究[J].航天器环境工程,2010,27(04):510-514.
- [8] 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,2006-05-17.