

管理
文库

anagement
故障模式和
影响分析(FMEA)

Failure Mode and
Effect Analysis

王绍印 编著



中山大学出版社

Zhongshan (Sun Yat-sen) University Press

管理文库

故障模式和影响分析 (FMEA)

王绍印 编著

中山大学出版社

·广州·

版权所有 翻印必究

图书在版编目(CIP)数据

故障模式和影响分析(FMEA)/王绍印编著. —广州:中山大学出版社, 2003.4
(管理文库)

ISBN 7-306-02063-3

I. 故… II. 王… III. 质量管理-研究 IV. F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 001510 号

责任编辑:方微之 封面设计:方楚涓 责任校对:张礼凤 责任技编:黄少伟

中山大学出版社出版发行

(地址:广州市新港西路 135 号 邮编:510275)

电话:020-84111998、84037215)

广东新华发行集团发行

广州市番禺区市桥印刷厂印刷

(地址:番禺区市桥环城西路 201 号 邮编:511400)

787 毫米×960 毫米 16 开本 8.75 印张 171 千字

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

印数:1-5000 册 定价:27.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读,请与承印厂联系调换

目 录

第一章 FMEA 概述	(1)
第一节 FMEA 概述	(1)
第二节 FMEA 的实施流程	(7)
第三节 质量环各阶段 FMEA 应用表格	(10)
第二章 FMEA 的应用方法	(19)
第一节 FMEA 的分析目的及分析步骤	(19)
第二节 确认分析对象	(20)
第三节 制作可靠性方框图	(21)
第四节 列举故障模式	(24)
第五节 缺陷影响分析	(27)
第六节 故障致命度评估	(29)
第七节 对策检讨	(30)
第八节 故障发生阶段、发生原因和检查方法	(34)
第九节 FMEA 方法的实施重点	(35)
第三章 故障模式	(37)
第一节 故障模式、原因与影响的关系	(37)
第二节 设备构成件常见故障模式	(39)
第三节 电子零件的故障模式	(42)
第四节 人为疏忽的故障模式	(43)
第四章 致命度/风险度评估方法	(49)
第一节 致命度和风险度评估方法	(49)
第二节 风险度/致命度评估表	(55)
第五章 FMEA 应用例	(61)
第一节 FMEA 的应用目的	(61)
第二节 设计阶段 FMEA 应用例	(63)
第三节 制造阶段 FMEA 应用例	(71)
第四节 使用阶段 FMEA 应用例	(82)
第五节 建筑、施工阶段 FMEA	(93)

第六章 FMEA 在控制计划中的应用	(95)
第一节 品质保证计划与 FMEA	(95)
第二节 可靠性保证计划与 FMEA	(101)
第三节 安全性保证计划与 FMEA	(108)
第七章 FMEA 方法在设计故障诊断装置中的应用	(113)
第一节 FMEA 分析在故障诊断装置设计时的应用	(113)
第二节 FMEA 在可靠性维护保养中的应用	(118)
第八章 故障树分析及潜在危险、操作性分析简介	(125)
第一节 故障树分析	(125)
第二节 潜在危险、操作性分析	(130)

第一章 FMEA 概述

第一节 FMEA 概述

FMEA 是“Failure Mode and Effect Analysis”的缩写，即“故障模式和影响分析”，是生产过程中一项事前预防的分析手段。工程技术人员自设计策划阶段开始，通过严密分析，列出及评估系统内潜在的失效模式和可能造成的后果，使设计、组装等作业时留意改善，通过各阶段持续评估、分析及改进，使产品逐步趋于最佳。它是应用广泛的设计评审与可靠性分析的重要工具。

一、FMEA 的历史及现状

20 世纪 50 年代，美国格鲁曼公司开发了 FMEA，用于飞机制造业的发动机故障防范，取得较好成果。美国航空及太空总署（NASA）实施阿波罗登月计划时，在合同中明确要求实施 FMEA。FMEA 现已被广泛运用于飞机制造、汽车制造等多个领域。

二、FMEA 的作用

FMEA 方法是通过标准表格来进行分析的。当构成系统的基本零件或构件发生故障时，上层子系统或系统会受到影响。通过 FMEA 可以分析出系统的可靠性、维护性、安全性等所受的影响，并确定可能导致重大故障或损失的零件或构件。FMEA 通过致命度和风险评估，将故障的重要度加以量化，从而指明了改善的优先顺序。根据 FMEA 分析结果，可以比较容易地进行与品质、可靠性、维护性、安全性等有关的设计、制造或系统上的改善，使目标系统的相关品质、技术参数和可靠性得到提高。FMEA 还可用于故障诊断设置的设计等方面。

FMEA 的分析对象一般为硬件，有时也可用于软件及人为问题的分析。

三、“系统”的概念

1. 系统。系统是指具有全部功能并可达成要求的任务的产品，如汽车、轮船、飞机等可以称为机械系统；电脑、卫星、移动电话等可称为电子系统。

2. 子系统。子系统是系统的构成部分，能达成系统的部分功能，如汽车的动力子系统、电脑的显示子系统等。

3. 构成件。构成件是构成子系统和系统的单元，可分为功能件、组件和零件。

(1) 功能件。功能件由零件组成，有独立的功能，如汽车电瓶、手机电池等。

(2) 组件。组件是两个以上零件的组合品，如汽车轮胎上的轴承。

(3) 零件。零件是在非破坏条件下无法再分的单品，如汽车上的一个螺丝、垫片等。

以上概念在 FMEA 分析中会常用到。

四、FMEA 的分析层次

FMEA 是一种确定系统或装置等故障原因的方法，当构成系统的子系统或构成件发生故障时，FMEA 可用来分析该故障对系统造成的影响，并确定造成重大影响的构成件。确定分析层次对 FMEA 分析至关重要，图 1-1 表示了 FMEA 的分析层次：

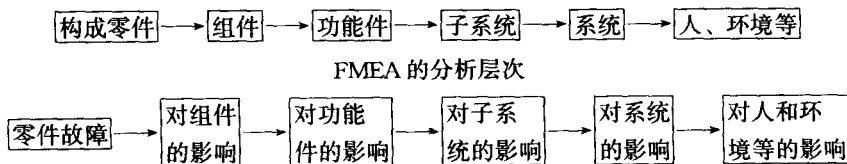


图 1-1 FMEA 的影响分析层次

五、FMEA 表格构成

FMEA 是对构成件本身或构成件设计、制造、组装、使用过程中的故障模式 (Failure Mode) 做影响分析 (Effects Analysis) 的方法，它通过 FMEA 表格进行分析，FMEA 表格需包含以下主要部分。

1. 构成件和故障模式

FMEA 分析从各构成件中列举故障模式开始。如表 1-1 所示，这里的“构成件”是指构成系统的单元，即功能件、组件和零件等，随分析对象不同，“构成件”可能被“过程”/“工序”所替代。

表 1-1

构成件	故障模式				
A	1				
	2				
	3				
	4				

故障模式指构成件可能发生的故障，特别是可感知的现象或特性变化，如：

变形	龟裂	松动
脱落	短路	开路
磨损	褪色	缺口

2. 列举故障模式的方法

(1) 实际故障模式与列举故障模式差异的影响。FMEA 是从列举各构成件的故障模式着手，根据所列之故障模式，分析其可能原因及对上层系统所造成的影响。列举故障模式的完整与准确程度直接影响分析及改善效果。举例说明，假设某个产品的关键零件 A 可能的故障模式有 20 种，而在列举故障模式时列举数量不是 20，如下表所示：

表 1-2

构成件	实际故障模式	列举故障模式	差异数	后果
A	20	10	-10	漏掉关键故障
		15	-5	可能漏掉关键故障
		25	+5	无不良后果

上表表示了列举故障模式与实际故障模式差异及其可能导致的后果。如果列举故障模式与实际故障模式差异太大，则漏掉关键故障的可能性就很大；相反，如果列举故障模式过多，并无不良后果产生。因而，在初始阶段就尽可能全面地列出各类故障模式对 FMEA 来说至关重要。

(2) 列举故障模式的方法。为了无遗漏地列举故障模式，应尽量避免由一个人大包大揽，而应集中众人的智慧。采用脑力激荡法是一个较好的方法。流程如下：

1) 集中几位（十几位也可）对该产品比较熟悉的人员（技术、管理、操作人员），组织者说明脑力激荡的主题。

2) 各参与人员轮流说出自己所想到的故障模式，由主持人记录，注意不要评论

别人的发言。

3) 脑力激荡完成后, 参与者逐一评估刚才的结果, 去掉重复及错误的故障模式, 所余即为列举的故障模式。

(3) 列举故障模式例。以汽车为系统, 以汽车喇叭为构成件, 列举的故障模式如下:

喇叭无声音	喇叭变形	喇叭破裂
喇叭声调过高	喇叭声音断续	喇叭松动
喇叭声调过低	喇叭断线	喇叭冒烟
喇叭声音沙哑	喇叭线脱落	喇叭生锈
喇叭声音过小	喇叭无法安装	喇叭发热
喇叭声音过大	喇叭颜色变化	喇叭振动
喇叭有臭味	摇动时喇叭发出噪音	

值得注意的是, 列举故障模式时, 需对对象的使用环境、频率、操作人员及其本身的特性有全面认识, 否则得出的结论往往是片面甚至错误的。

3. 影响分析

在列举各构成件的故障模式后, 即可进行影响分析。影响分析是在 FMEA 表格上分析各构成件的各类故障模式对上层子系统或系统的品质、功能、可靠性、安全性、经济性或环境等造成何种影响。针对不同的产品, 需评估的影响是不同的, 因而根据不同的产品选择适当的评估项目至关重要。当然, 各故障模式对子系统、系统功能的影响是必须评估的项目。表 1-3 说明了 FMEA 分析时对缺陷影响的评估概要。

表 1-3

构成件	故障模式	故障影响					
		子系统功能	系统功能	安全性	可靠性	经济性	环境
A	1	功能丧失	功能丧失	重伤	降低	损失 15 万元	轻度污染
	2	性能下降	无影响	无影响	降低	无损失	无影响
	3						
	4						

4. 致命度评估

进行 FMEA 分析的最终目的是确定可能的故障原因并予以预防, 而公司资源是有限的, 不可能对所有的原因同时采取措施, 比较可行的做法是针对那些影响较大的故障及原因采取改善对策。评估故障所造成的破坏的指标称为“致命度”。FMEA 分析技术可以量化各类故障的致命度, 并对其进行排序, 在改善及预防时只需重点改善

致命度评分较高、排序较靠前的故障即可。

(1) 致命度的计算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{致命度} &= \text{故障发生频度} \times \text{故障影响度} \\ &= \text{故障发生频度} \times (\text{功能} + \text{安全性} + \text{经济性} + \text{可靠性} + \text{环境}) \end{aligned}$$

式中：致命度指故障所造成的破坏程度；

故障发生频度指特定故障模式发生的可能频度；

故障影响度指特定故障模式发生后对系统功能、安全性、经济性、可靠性和环境等所造成的影响。

(2) 故障发生频度的量化评价。前文指出，FMEA 方法可以量化潜在故障模式的致命度，它是通过量化故障发生频度和故障影响度来量化致命度的。对故障发生频度而言，评价的具体方法是将发生频度分为几个等级，如表 1-4 所示：

表 1-4

等级	故障发生频度
10	发生频度非常高
8	发生频度高
6	发生频度低
4	很少发生
2	几乎不发生

从上表可以看出，FMEA 方法量化评价的基本思想是将定性指标转化为定量指标，从而使综合评价成为很容易的事。

(3) 故障影响度的量化评价。与故障发生频度类似，故障影响度也可量化评价，评价的表格如下：

表 1-5

等级	故障影响度
10	致命影响，功能丧失、死亡
8	重大影响，功能丧失、重伤
6	较大影响，功能部分丧失、受伤
4	轻微影响，轻伤
2	影响极小

需要注意的是在评估故障影响时，对系统功能的评价与安全性、可靠性、经济性等影响的评价均适用上表。

(4) 致命度评价例。根据故障发生频度表及故障影响度表, 可以很方便地计算特定故障的致命度, 举例如下表:

表 1-6

构成件	故障模式	故障发生频度	故障影响						致命度	排序
			子系统功能	系统功能	安全性	可靠性	经济性	环境		
A	1	6	功能丧失 10	功能丧失 8	重伤 8	降低 4	损失 15 万元 6	污染 4	240	2
	2	2	性能下降 6	无影响 2	无影响 2	降低 4	无损失 2	无影响 2	36	35
	3									
	4									

上表中, 致命度计算方法如下:

$$240 = 6 \times (10 + 8 + 8 + 4 + 6 + 4)$$

$$36 = 2 \times (6 + 2 + 2 + 4 + 2 + 2)$$

5. 排序

进行致命度量化评价的目的是为了确定需要进行改善的构成件或工序, 致命度数值越大, 则该故障模式所造成的破坏越大, 越应该对其进行分析改善。根据致命度数据大小可对故障模式进行排序。致命度数值最高的排序为 1, 再依次向后排, 在进行分析改善时, 从排序最靠前的故障模式开始。按照柏拉图原则, 一般而言, 占排序前 20% 部分所导致的致命度占总致命度数值的 80% 以上, 需针对该 20% (大致为 20% 左右) 的关键少数故障模式进行改善, 这样投入资源较少, 而收益非常明显。本例中, 故障模式的排序见上表“排序”栏。

六、FMEA 分析结果的应用

综前所述, FMEA 方法通过表格形式分析确认各构成件或作业过程的潜在缺陷/故障模式、缺陷/故障原因、缺陷/故障影响, 并按缺陷/故障模式对系统/子系统的破坏程度对其进行排序。通过 FMEA 可筛选出对系统影响最大的潜在缺陷/故障模式, 这类缺陷/故障模式是不允许其存在的, 因此需在设计、制造、品质保证和使用各阶段对其进行控制, 从而防止重要缺陷的发生及危害。FMEA 分析也可以在设计机器、设备等的故障诊断系统时用于完善设计过程。

七、FMEA 的应用状况

由于 FMEA 在分析潜在缺陷方面方法灵活, 考虑细致周密, 作用显著, 现已越来越被广泛采用。应用阶段包括从产品设计, 开发时的可靠性、安全性、环保性、工艺性分析至产品制造, 组装甚至使用阶段的改善及控制等各个方面。应用范围更是涉及汽车、航空、航天、电力、建筑、机械制造、电子等各个行业。在 ISO 9000 标准中, FMEA 作为标准应用工具之一, 在产品开发、设计、制造的各个阶段必须采用。可以说 FMEA 的广泛使用, 使汽车制造业的品质、可靠性、安全性、工艺性等迅速达到很高的水准。现将 FMEA 在各行业各阶段的应用状况列于表 1-7。

表 1-7

行业 阶段	车辆制造	电力设施	航空航天	家电	建筑	其他行业
新产品策划	汽车构成分件	发电装置	发动机	电路 电子元件		
设计	控制回路 刹车系统	发电机组件	发动机 整机构件	整机构件	施工方法 住宅/办公 区 空调系统 防火系统 给水系统	机械设备构 成件
制造	动力子系统 热处理过程 控制油路、 汽路、电路 布局		整机构件	整机构件		合成材料制 造
使用	发动机漏油 保养方法	保养作业 运行方法 变压器检查		操作方法 保养方法		操作方法 保养方法

第二节 FMEA 的实施流程

上节讲述了 FMEA 的基本构成及分析方法, 那么 FMEA 在一个组织活动的各阶段的作用如何? 何时需要实施 FMEA, 其实施流程如何呢? 本节将作一介绍。

一、FMEA 在组织活动各阶段的定位

FMEA 作为一种重要的可靠性分析工具, 在组织活动的各个阶段均会用到。FMEA 的应用, 从系统或子系统的策划、开发阶段有计划地进行, 并由设计阶段延伸至制造及使用阶段。设计阶段中, FMEA 的分析结果可用于指出设计上的问题点, 从而进行设计改善, 并可用来确认产品设计是否满足客户需求; 在制造阶段, FMEA 分析结果可以用于指出产品加工、装配、来料、设计方面的问题, 从而反推到前一工序或前一阶段, 要求其进行必要的改善。实施 FMEA 可以确定设计、制造、品质保证、来料等管理上的重点, 同时可以诊断系统及机器故障, 或为选择设备保养方式及频度提供重要依据。

需要说明的是, FMEA 分析内容需随改善的实施和过程状况的变化而随时更新, 以实时显示故障模式及影响度, 举例说明如下, 假设一个产品改善前的故障及致命度如表 1-8 所示 (部分):

表 1-8

构成件	故障模式	故障影响						致命度
		子系统功能	系统功能	安全性	可靠性	经济性	环境	
A	1 (6)	功能丧失 10	功能丧失 8	重伤 8	降低 4	损失 15 万元 6	污染 4	240
	2 (4)	功能丧失 10	功能下降 6	轻伤 6	降低 4	损失 5 万元 4	无影响 2	128
	3 (8)	功能下降 6	无影响 2	无影响 2	降低 4	无损失 2	无影响 2	144

经过对故障模式“1”进行改善后的 FMEA 表如表 1-9 所示 (部分):

表 1-9

构成件	故障模式	故障影响						致命度
		子系统功能	系统功能	安全性	可靠性	经济性	环境	
A	1 (2)	功能下降 10	无影响 2	轻伤 6	无影响 2	损失 1 万元 2	无影响 2	40
	2 (4)	功能丧失 10	功能下降 6	轻伤 6	降低 4	损失 5 万元 4	无影响 2	128
	3 (4)	功能无影响 2	无影响 2	无影响 2	无影响 2	无损失 2	无影响 2	48

从改善前后的 FMEA 表（部分）可以看出，改善前故障模式“1”的致命度最高，“3”的致命度次之，“2”的致命度最低。经过对排序靠前的“1”和“3”故障模式进行改善后，故障的致命度格局完全发生变化，各故障模式的致命度排序由前到后依次变为：“2”，“3”，“1”。假设该例已经过改善故障模式“1”和“3”而未更新 FMEA 表，会漏掉问题和引起混乱。

二、何时需要进行 FMEA 分析

原则上，FMEA 方法可用于任何阶段的可靠性分析和品质管理改善，尤其适用于以下状况：

- (1) 为了缩短制造准备工作所需时间，消除重复性过程不良。
- (2) 新产品设计时，充分列举可能的问题点，为后续设计做好铺垫。
- (3) 在产品品质计划制订时。
- (4) 产品在客户处多发缺陷/故障，而在本公司未发现时。

三、FMEA 的实施流程

为了保证 FMEA 方法实施的效率和效果，必须在品质保证或可靠性保证计划制订时明确规定 FMEA 的实施阶段、频度等。FMEA 是一项比较庞大的系统工程，单靠一个人、一个部门去实施很难达到预期的效果，一般需根据需要组织一个跨部门小组来实施。小组成员一般应包括：品质部、设计部、工程技术部、制造部，支持性成员一般涉及：采购部、营业部、物控部等。FMEA 实施的一般流程如下：

1. 实施前准备

(1) 收集客户要求、实际故障发生种类，了解设计思想，调查使用条件、制造条件、环境条件、使用者习惯等。

(2) 确定 FMEA 分析的阶段，即确定在产品的策划、开发、设计、制造、试验、使用的哪一个阶段实施 FMEA，根据阶段不同，选用不同的 FMEA 分析表。

(3) 确定致命度评价表。根据确定的 FMEA 分析阶段，结合产品特点，确定故障发生频度、故障影响度、故障检出可能性等相关的评价表，在确定评价表对应栏填入故障相关项目时，组员间的评价标准应尽可能统一，最终综合大家意见达成一致。在开始 FMEA 分析后，评价表可根据实际状况加以调整。

2. 实施 FMEA

(1) 制作系统可靠性方块图。

(2) 为尽量多地列举各个构成件的故障模式，最好集中具有相关知识、经验的人员，用脑力激荡法来获取。

(3) 分析各故障模式的影响度、发生频度、发生原因、检查难易度等, 分析时从客户要求、可靠性、安全性、环境、操作步骤等角度来考虑。

3. 检讨和评估结果

完成 FMEA 分析后, 须仔细检讨故障模式是否有遗漏, 表达是否准确, 各故障模式的影响度、发生频度、发生原因、检查难易度等是否存在明显偏差或错误, 并根据实际情况做更改与完善。

4. 实施改善对策

在检讨和评估结束后, FMEA 所确定的对关键故障原因所采取的对策需予以实施, 并根据产品、过程表现判定实施效果, FMEA 表格需随对策实施效果的确认而动态调查。

第三节 质量环各阶段 FMEA 应用表格

FMEA 方法是以表格形式进行分析和改善的, 在不同的阶段, FMEA 表格的项目和着重点是不同的。本节将对此作一分析介绍。

一、通用 FMEA 表

并无强制规定标准的 FMEA 表应该是什么样子, 各个公司的 FMEA 表也均有自己的特点, 但总体包含的主要项目是一样的。表 1-10 是一个通用 FMEA 表格(部分)。

表 1-10

构成件	功能	故障模式	故障原因	故障影响	检查方法	发生频度	风险度	对策

上表中各项意义如下:

1. 构成件

即构成产品(系统)的最低层次, 如零件、组件等。在填写“构成件”栏时, 须保证各构成件的层次相同, 如第一个构成件为“车左门”, 第二个构成件不能为“螺丝”, 因为二者的层次不同。

2. 功能

构成件的功能。

3. 故障模式

构成件的故障现象、类别。

4. 故障原因

故障产生的原因，一般均有几个原因，针对不同的原因，可能有不同的发生频度。

5. 故障影响

构成件发生特定故障时，对上层子系统或系统所造成的影响，可同步考虑故障对安全性、可靠性、环境等造成的影响。

6. 检查方法

目前所采取的针对该故障的检查方法。

7. 发生频度

特定故障模式发生的可能性及频率。

8. 风险度

评估出特定故障模式的发生频度、影响程度和检出方法后所求得的值。通过风险度评估可以确定改善优先顺序。

9. 对策

针对特定故障模式所采取的对应措施。确定对策时需综合考虑效果、所需成本、风险、时间等因素。对策措施可能涉及的方面有：

- (1) 为降低特定故障模式的发生频度而采取对策。
- (2) 为降低特定故障的影响而采取对策。

二、设计开发阶段的 FMEA 表

在产品设计和开发阶段实施 FMEA 的目的是确定与产品设计有关的可靠性与安全性等问题点，为了能确定重要故障模式，一般采用“致命度”评估而非“风险度”评价。

1. “致命度”与“风险度”的差异

“致命度”与“风险度”是两个不同的概念。“风险度”包含了对故障检出可能性的评估，而“致命度”未包含对检出可能性的评估。公式如下：

致命度 = 故障发生频度 × 故障影响度

风险度 = 故障发生频度 × 故障影响度 × 检出可能性

产品设计阶段主要考虑故障发生的频度及其对系统、使用者和环境的影响，检出可能性更多在工艺设计时考虑，因而设计阶段 FMEA 采用“致命度”来评价某种特定故障的破坏力。

2. 设计阶段 FMEA 应用目的

设计阶段 FMEA 应用的目的如下:

(1) 在新产品开发设计时, 确定对品质、可靠性、维护性、安全性和环境所造成问题的特定故障模式。

(2) 通过预先指出问题点并检讨对策, 可通过改善缩短开发周期, 节约开发成本。

(3) 通过设计 FMEA, 可以确定在产品制造、使用各阶段与可靠性、安全性有关的故障模式, 以便有针对性地采取预防和维护措施。

(4) 通过设计 FMEA, 可以确定影响产品寿命的关键故障原因。

(5) 确定新增产品功能时可能出现的重要故障及原因。

(6) 在设计系统可靠性测试计划时, 确定故障模式及原因。

(7) 设计评审时进行检讨和制订相应改善对策。

3. 设计开发阶段 FMEA 表的格式

举例说明如表 1-11:

表 1-11

构成件	功能	故障模式	发生阶段	故障原因	故障影响	对其他系统的影响	致命度	对策	重新评估致命度
二轴组件	动态读取碟片信号	不聚焦 4	开机时	聚焦线圈断路	光头不工作 10	无法读碟 10	80	A	26
		动作灵敏度低 2	工作时	二轴架材料选择不良	光头工作轻微异常 4	劣质碟无法读 4	16	不需对策	—

上表与通用 FMEA 表格的区别部分说明如下:

(1) 发生阶段。针对设计后可能发生的故障模式, 在设计 FMEA 时, 需对可能的发生阶段进行检讨, 设计 FMEA 涉及故障模式可能的发生阶段如下:

制造阶段: 包括加工、组装、检查、搬运、包装、存贮、安装、调试等流程。

使用阶段: 包括启动、运转、停止、维护、保养等流程。

在进行设计 FMEA 时, 需根据以上各个阶段, 结合各阶段的动作条件、环境、人员素质、各方面限制等列举尽可能周详的故障模式。

(2) 对其他系统的影响。某种特定故障模式可能会影响到该系统以外的系统, 在