

故障模式影响及危害度分析

FMECA

中国可靠性网 整理

www.kekaoxing.com

北京航空航天大学工程系统工程系

内容提要

- 概述
- FMECA的定义、目的和作用
- FMECA的方法
- FMECA的步骤
 - 系统定义
 - 故障模式影响分析
 - 危害性分析
 - 危害性矩阵图
- FMECA输出与注意的问题
- 应用案例

概述

- 元部件的故障对系统可造成重大影响
 - 灾难性的影响
 - 挑战者升空爆炸——发动机液体燃料管垫圈不密封
 - 致命性的影响
 - 起落架上位锁打不开
- 以往设计师依靠经验判断元部件故障对系统的影响
 - 依赖于人的知识和工作经验
- 系统的、全面的和标准化的方法—FMECA
 - 设计阶段发现对系统造成重大影响的元部件故障
 - 设计更改、可靠性补偿
- 是可靠性、维修性、保障性和安全性设计分析的基础



FMECA的概念

□ FMECA的定义

- 故障模式影响及危害性分析(Failure Mode ,Effects and Criticality analysis , 简记为FMECA)是分析系统中每一产品所有可能产生的故障模式及其对系统造成的所有可能影响, 并按每一个故障模式的严重程度及其发生概率予以分类的一种归纳分析方法。

□ FMECA是一种自下而上的归纳分析方法;

□ FMEA和CA。

□ FMECA的目的

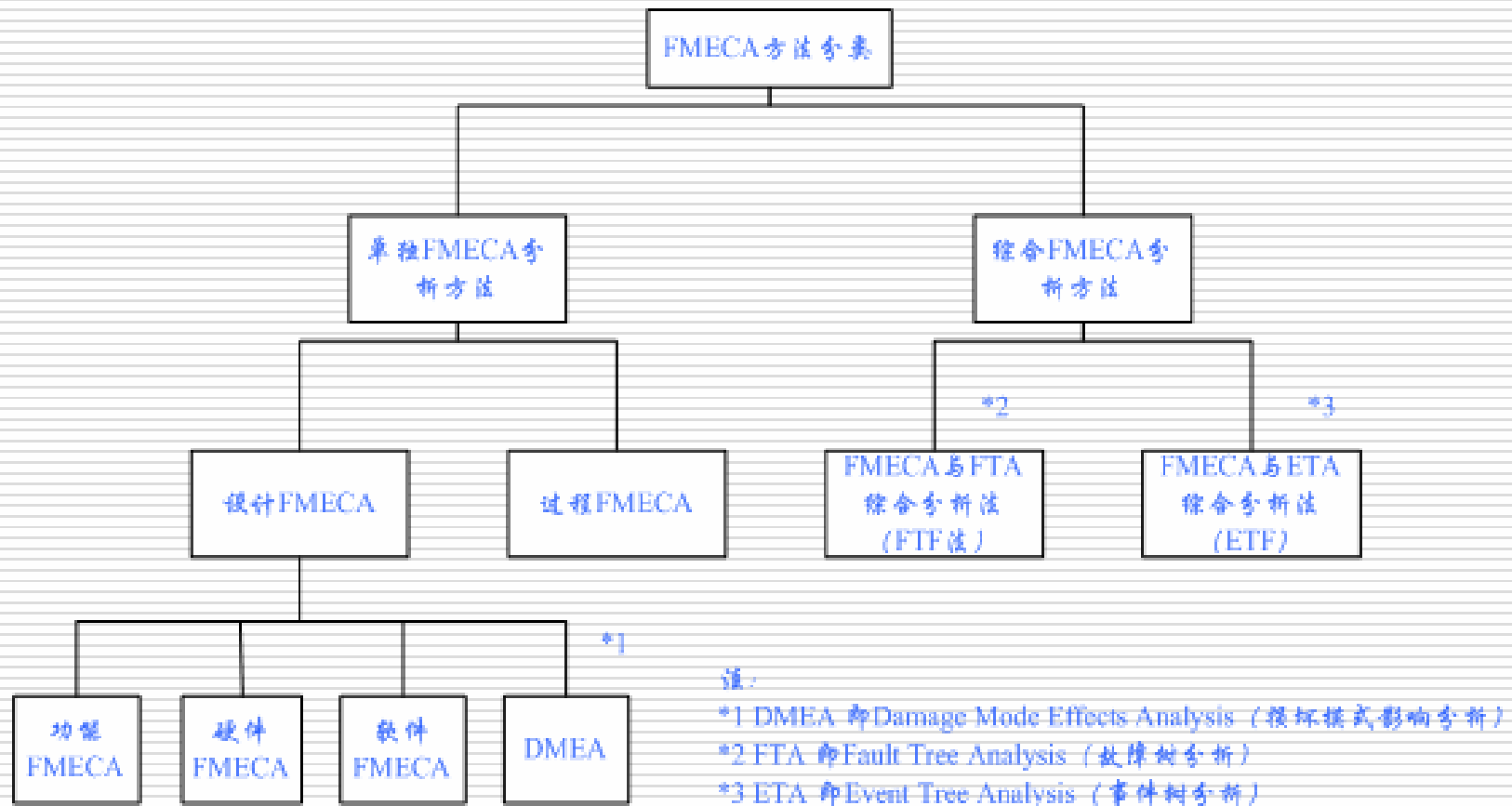
- 从产品设计(功能设计、硬件设计、软件设计)、生产(生产可行性分析、工艺设计、生产设备设计与使用)和使用发现各种影响产品可靠性的缺陷和薄弱环节, 为提高产品的质量和可靠性水平提供改进依据。

FMECA作用

- 保证有组织地定性找出系统的所有可能的故障模式及其影响，进而采取相应的措施。
- 为制定关键项目和单点故障等清单或可靠性控制计划提供定性依据。
- 为可靠性 (R)、维修性 (M)、安全性 (S)、测试性 (T) 和保障性 (S) 工作提供一种定性依据。
- 为制定试验大纲提供定性信息。
- 为确定更换有寿件、元器件清单提供使用可靠性设计的定性信息。
- 为确定需要重点控制质量及工艺的薄弱环节清单提供定性信息。
- 可及早发现设计、工艺中的各种缺陷。



FMECA方法分类

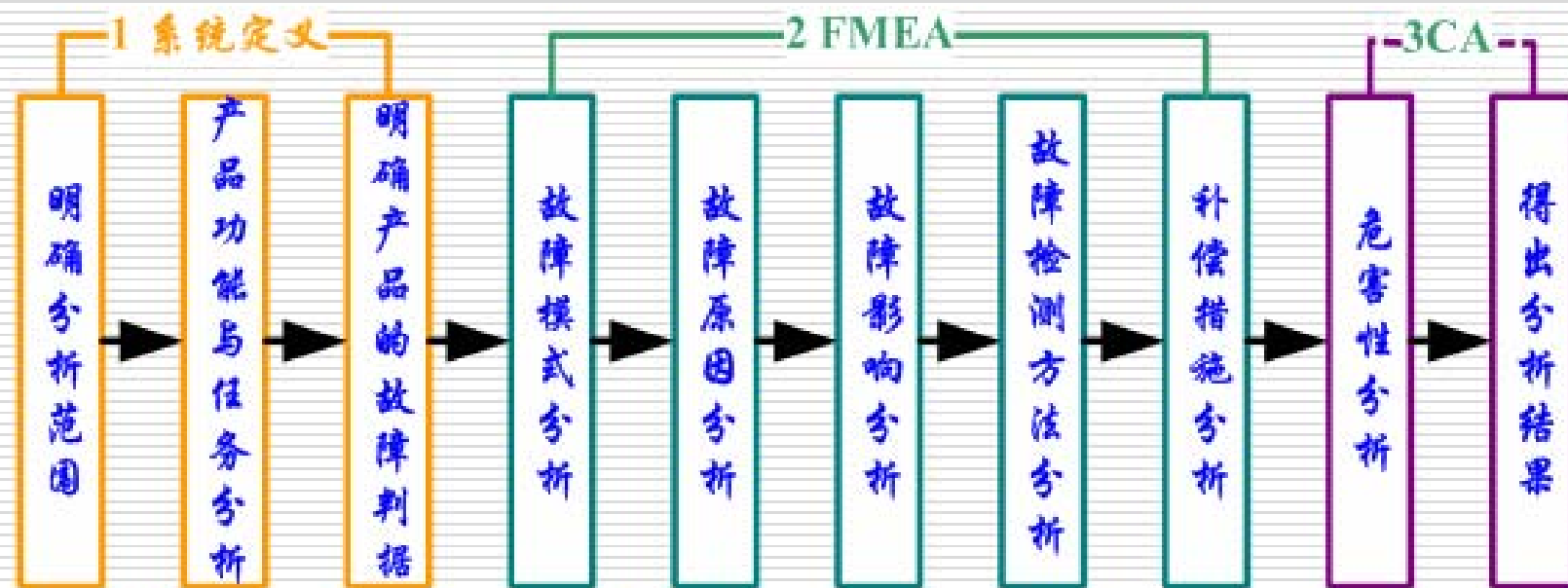


在产品寿命周期 各阶段的FMECA方法

	论证与方案阶段	工程研制阶段	生产阶段	使用阶段
方法	功能FMECA	·硬件FMECA ·软件FMECA ·损坏模式影响分析	过程FMECA	统计FMECA
目的	分析研究系统功能设计的缺陷与薄弱环节，为系统功能设计的改进和方案的权衡提供依据。	分析研究系统硬件、软件设计的缺陷与薄弱环节，为系统的硬件、软件设计改进和保障性分析提供依据。	分析研究所设计的生产工艺过程的缺陷和薄弱环节及其对产品的影响，为生产工艺的设计改进提供依据。	分析研究产品使用过程中实际发生的故障、原因及其影响，为提供产品使用可靠性和进行产品的改进、改型或新产品的研制提供依据。



FMECA的步骤



1 系统定义

- 确定系统中进行FMECA的产品范围
 - 产品层次示例
 - 约定层次——规定的FMECA的产品层次
 - 初始约定层次——系统最顶层
 - 最低约定层次——系统最底层
- 描述系统的功能任务及系统在完成各种功能任务时所处的环境条件
 - 任务剖面、任务阶段及工作方式
 - 功能描述
- 制定系统及产品的故障判据、选择FMECA方法等
 - 故障判据
 - 分析方法

2 故障模式影响分析FMEA

初始约定层次产品
约定层次产品

任 务
分析人员

审核
批准

第 页 共 页
填表日期

代 码	产 品 或 功 能 标 志	功 能	故 障 模 式	故 障 原 因	任 务 阶 段 与 工 作 方 式	故障影响			严 酷 度 类 别	故 障 检 测 方 法	补 偿 措 施	备 注
						局 部 影 响	高 一 层 次 影 响	最 终 影 响				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
对每一产品的每一故障模式采用一种编码体系进行标识	记录被分析产品或功能的名称与标志。	简要描述产品所具有的主要功能	根据故障模式分析的结果简要描述每一产品的所有故障模式	根据故障原因分析结果简要描述每一故障模式的所有故障原因	简要说明发生故障的任务阶段与产品的工作方式	根据故障影响分析的结果，简要描述每一个故障模式的局部、高一层次和最终影响并分别填入第7栏--9栏			根据最终影响分析的结果按每个故障模式分配严酷度类别	简要描述故障检测方法	简要描述补偿措施	本栏主要记录对其它栏的注释和补充说明

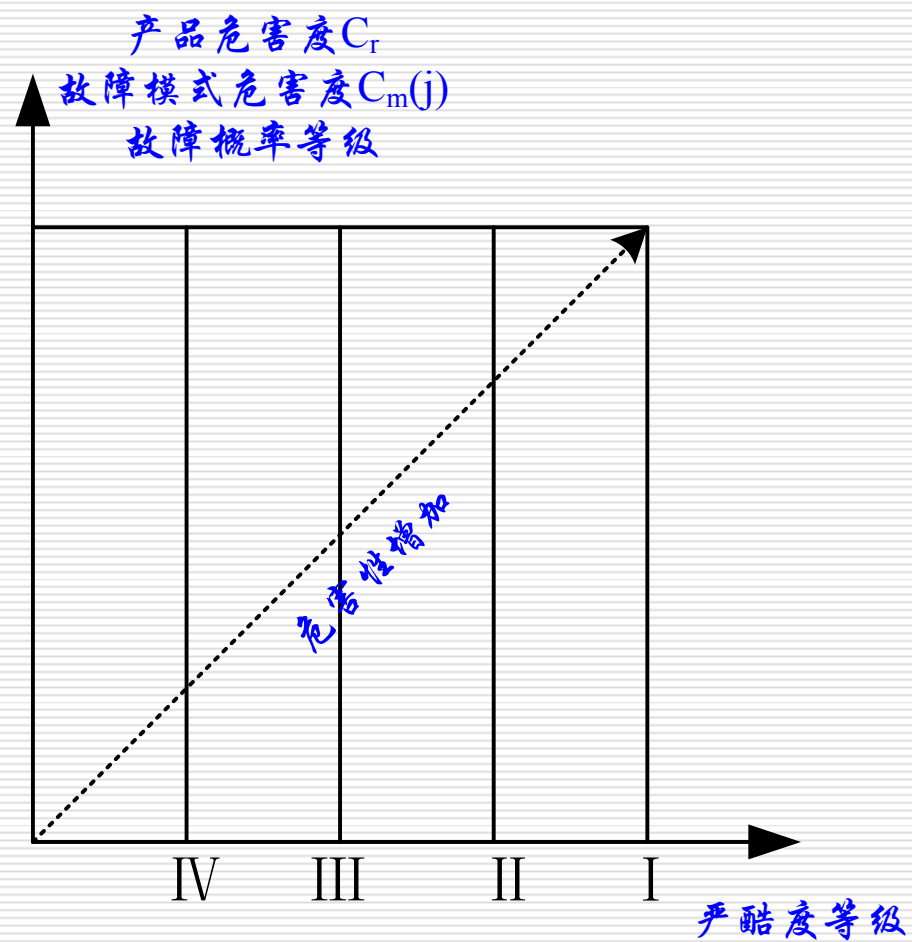
3 危害性分析(CA)

□ 分类：定性和定量

□ CA表

初始约定层次产品 约定层次产品					任 务 分析人员		审 核 批 准		第 页 共 页 填表日期					
代 码	产 品 或 功 能 标 志	功 能	故 障 模 式	故 障 原 因	任 务 阶 段 与 工 作 方 式	严 酷 度 类 别	故 障 率 等 级 或 故 障 数 据 源	故 障 率 λ_p	故 障 模 式 频 比 α	故 障 影 响 概 率 β	工 作 时 间 t	故 障 模 式 危 害 度 $C_m(j)$	产 品 危 害 度 $C_r(j)$	备 注
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

危害性矩阵图



FMECA输出与注意的问题

□ FMECA输出

- 单点故障模式清单
- I、II类故障模式清单
- 可靠性关键件、重要件
- 不可检测故障模式清单
- 危害性矩阵图等
- FMEA/CA表

实施FMECA应注意的问题

□ 强调“谁设计、谁分析”的原则

- “谁设计、谁分析”的原则，也就是产品设计人员应负责完成该产品的FMECA工作，可靠性专业人员应提供分析必须的技术支持。
- 实践表明，FMECA工作是设计工作的一部分。“谁设计、谁分析”、及时改进是进行FMECA的宗旨，是确保FMECA有效性的基础，也是国内外开展FMECA工作经验的结晶。如果不由产品设计者实施FMECA，必然造成分析与设计的分离，也就背离了FMECA的初衷。

实施FMECA应注意的问题

□ 重视FMECA的策划

■ 实施FMECA前，应对所需进行的FMECA活动进行完整、全面、系统地策划，尤其是对复杂大系统，更应强调FMECA的重要性。其必要性体现在以下几方面：

- 结合产品研制工作，运用并行工程的原理，对所需的FMECA进行完整、全面、系统地策划，将有助于保证FMECA分析的目的性、有效性，以确保FMECA工作与研制工作同步协调，避免事后补做的现象。
- 对复杂大系统，总体级的FMECA往往需要低层次的分析结果作为输入，对相关分析活动的策划将有助于确保高层次产品FMECA的实施。
- FMECA计划阶段事先规定的基本前提、假设、分析方法和数据，将有助于在不同产品等级和承制方之间交流和共享，确保分析结果的一致性、有效性和可比性。

实施FMECA应注意的问题

□ 保证FMECA的实时性、规范性、有效性

- 实时性。FMECA工作应纳入研制工作计划，做到目的明确、管理务实；FMECA工作与设计工作应同步进行，将FMECA结果及时反馈给设计过程。
- 规范性。分析工作应严格执行FMECA计划、有关标准/文件的要求。分析中应明确某些关键概念，比如：故障检测方法是系统运行或维修时发现故障的方法；严酷度是对故障模式最终影响严重程度的度量，危害度是对故障模式后果严重程度的发生可能性的综合度量，两者是不同的概念，不能混淆。
- 有效性。对分析提出的改进、补偿措施的实现予以跟踪和分析，以验证其有效性。这种过程也是积累FMECA工程经验的过程。

实施FMECA应注意的问题

□ FMECA的剪裁和评审

- FMECA作为常用的分析工具，可为可靠性、安全性、维修性、测试性和保障性等工作提供信息，不同的应用目的可能得到不同的分析结果。各单位可根据具体的产品特点 and 任务对FMECA的分析步骤、内容进行补充，剪裁，并在相应文件中予以明确。

实施FMECA应注意的问题

□ FMECA的数据

- 故障模式是FMECA的基础。能否获得故障模式的相关信息是决定FMECA工作有效性的关键。若进行定量分析时还需故障的具体数据，这些数据除通过试验获得外，一般是需要通过相似产品的历史数据进行统计分析。有计划有目的地注意收集、整理有关产品的故障信息，并逐步建立和完善故障模式及频数比的相关故障信息库，这是开展有效的FMECA工作的基本保障之一。

□ FMECA应与其他分析方法相结合

- FMECA虽是有用的可靠性分析方法，但并非万能。它不能代替其他可靠性分析工作。应注意FMECA一般是静态的、单一因素的分析方法。在动态方面还很不完善，若对系统实施全面分析还需与其他分析方法（如FTA、ETA等）相结合。

故障模式

□ 故障与故障模式

- 故障是产品或产品的一部分不能或将不能完成预定功能的事件或状态（对机械产品也称失效）
- 故障模式是故障的表现形式，如起落架撑杆断裂、作动筒间隙不当、收放不到位等

□ 产品功能与故障模式

- 一个产品可能具有多种功能
 - 起落架：支撑、滑跑、收放等
- 每一个功能有可能具有多种故障模式
 - 支撑：降落时折起
 - 滑跑：震动
 - 收放：收不起、放不下

典型故障模式

GJB1391 《故障模式影响及危害性分析》

序	故障模式	序	故障模式	序	故障模式
1	结构故障(破损)	12	超出允差(下限)	23	滞后运行
2	捆结或卡死	13	意外运行	24	错误输入(过大)
3	振动	14	间歇性工作	25	错误输入(过小)
4	不能保持正常位置	15	漂移性工作	26	错误输出(过大)
5	打不开	16	错误指示	27	错误输出(过小)
6	关不上	17	流动不畅	28	无输入
7	误开	18	错误动作	29	无输出
8	误关	19	不能关机	30	(电的)短路
9	内部漏泄	20	不能开机	31	(电的)开路
10	外部漏泄	21	不能切换	32	(电的)漏泄
11	超出允差(上限)	22	提前运行	33	其它

机械产品典型故障模式

□ 故障模式可分为以下七大类：

- 损坏型：如断裂、变形过大、塑性变形、裂纹等。
- 退化型：如老化、腐蚀、磨损等。
- 松脱性：松动、脱焊等
- 失调型：如间隙不当、行程不当、压力不当等。
- 堵塞或渗漏型：如堵塞、漏油、漏气等。
- 功能型：如性能不稳定、性能下降、功能不正常。
- 其他：润滑不良等。



故障原因

- 直接原因：导致产品功能故障的产品自身的那些物理、化学或生物变化过程等，直接原因又称为故障机理。
- 间接原因：由于其他产品的故障、环境因素和人为因素等引起的外部原因。
- 例如——起落架上位锁打不开
 - 直接原因：锁体间隙不当、弹簧老化等
 - 间接原因：锁支架刚度差



任务阶段与工作方式

☐ 任务剖面又由多个任务阶段组成

■ 起落架任务阶段：

☐ 起飞

☐ 着陆

☐ 空中飞行

☐ 地面滑行

☐ 工作方式：

■ 可替换

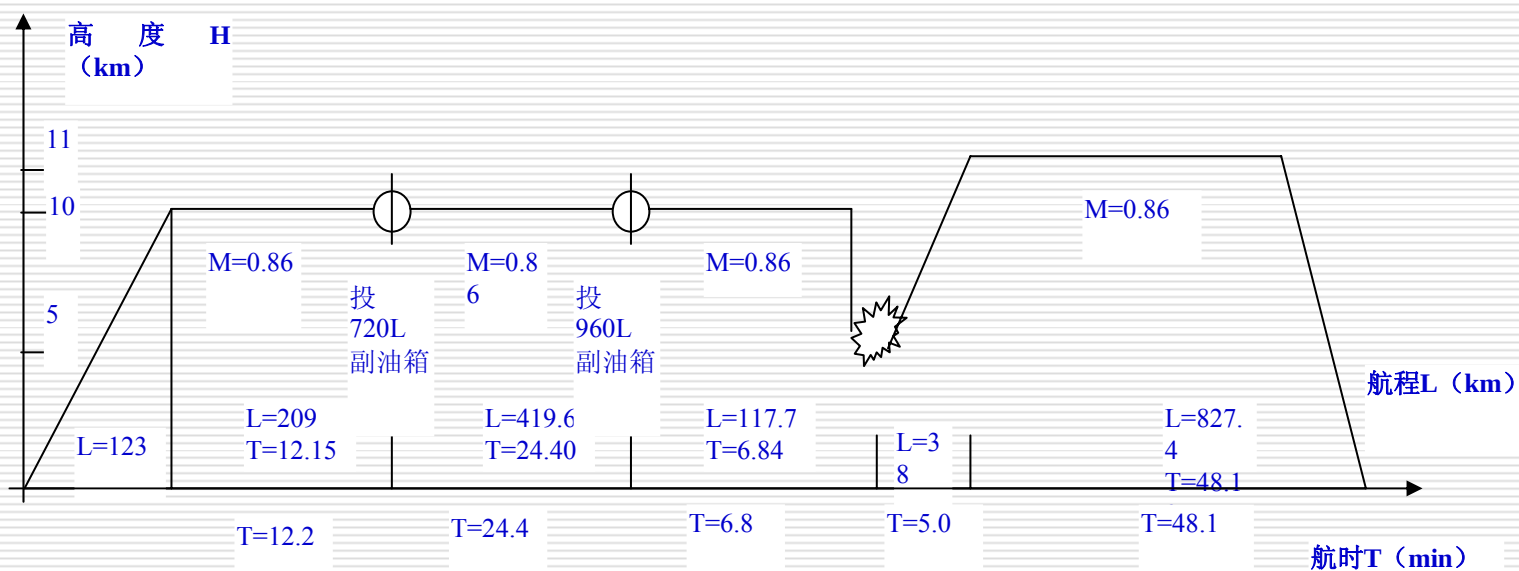
■ 有余度

☐ 上位锁开锁：液压、手动钢索、冷气

☐ 因此，在进行故障模式分析时，要说明产品的故障模式是在哪一个任务剖面的哪一个任务阶段的什么工作方式下发生的。



任务剖面



空—空剖面1



故障影响

□ 故障影响与约定层次

■ 约定层次示例

□ 故障影响

- 局部影响: 某产品的故障模式对该产品自身和与该产品所在约定层次相同的其他产品的使用、功能或状态的影响
- 高一层次影响: 某产品的故障模式对该产品所在约定层次的高一层次产品的使用、功能或状态的影响
- 最终影响: 指系统中某产品的故障模式对初始约定层次产品的使用、功能或状态的影响



严酷度类别

- 严酷度：产品故障造成的最坏后果的严重程度
- 严酷度类别定义(GJB1391)

严酷度类别	严重程度定义
I类(灾难的)	这是一种会引起人员死亡或系统(如飞机、坦克、导弹及船舶等)毁坏的故障。
II类(致命的)	这种故障会引起人员的严重伤害、重大经济损失或导致任务失败的系统严重损坏。
III类(临界的)	这种故障会引起人员的轻度伤害，一定的经济损失或导致任务延误或降级的系统轻度损坏。
IV类(轻度的)	这是一种不足以导致人员伤害、一定的经济损失或系统损坏的故障，但它会导致非计划性维护或修理。



故障检测方法

- 故障检测方法一般包括目视检查、离机检测、原位测试等手段：
 - 自动传感装置
 - 传感仪器
 - 音响报警装置
 - 显示报警装置
- 故障检测一般分为事前检测与事后检测两类，对于潜在故障模式，应尽可能设计事前检测方法。



补偿措施

□ 设计补偿措施

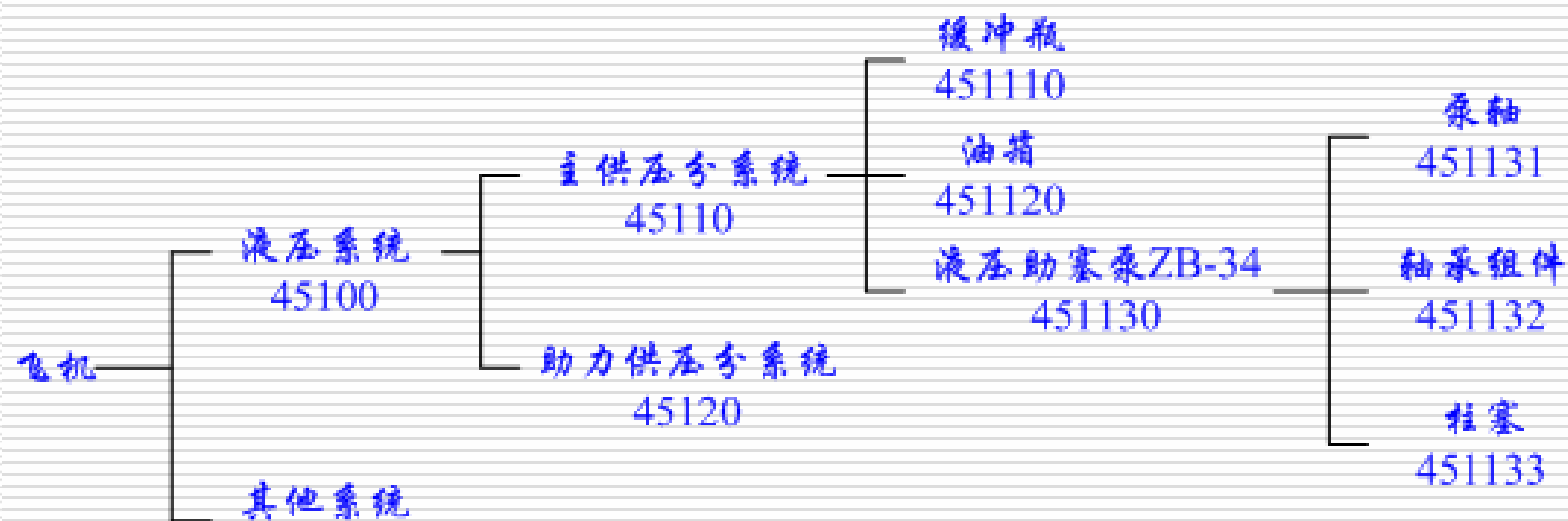
- 产品发生故障时，能继续安全工作的冗余设备
- 安全或保险装置(如监控及报警装置)
- 可替换的工作方式(如备用或辅助设备)
- 可以消除或减轻故障影响的设计或工艺改进(如概率设计、计算机模拟仿真分析和工艺改进等)

□ 操作人员补偿措施

- 特殊的使用和维护规程，尽量避免或预防故障的发生
- 一旦出现某故障后操作人员应采取的最恰当的补救措施



约定层次示例



系统定义 

故障影响 

故障概率等级或数据来源

□ 故障概率等级——定性分析方法

- A级--经常发生 $>20\%$
- B级--有时发生 $10\% > 20\%$
- C级--偶然发生 $1\% > 10\%$
- D级--很少发生 $0.1\% > 1\%$
- E级--极少发生 $<.0.1\%$

□ 数据来源

- 预计值
- 分配值
- 外场评估值等



故障模式频数比

故障模式频数比

- 故障模式频数比 α 是产品的某一故障模式占其全部故障模式的百分比率。如果考虑某产品所有可能的故障模式，则其故障模式频数比之和将为1
- 模式故障率 λ_m 是指产品总故障率 λ_p 与某故障模式频数比 α 的乘积

例：故障模式频数比及模式故障率

气体控制活门故障模式	故障模式频数比 α	产品故障率 λ_p	模式故障率 λ_m
不闭合	34%	0.12345	0.04197
不打开	57%		0.07036
外部漏气	9%		0.01111
总计	1.0		0.12345



故障影响概率

故障影响概率 β 是指假定某故障模式已发生时，导致确定的严酷度等级的最终影响的条件概率。某一故障模式可能产生多种最终影响，分析人员不但要分析出这些最终影响还应进一步指明该故障模式引起的每一种故障影响的百分比，此百分比即为 β 。这多种最终影响的 β 值之和应为1

故障影响概率示例

产品名称	故障模式	故障模式频数比 α	故障影响	严酷度	故障影响概率 β
制动系统	卡死	0.5	● 火车滑轨并驶入火车站	II	0.9
			● 火车脱轨	I	0.1
	效率降低	0.5	● 火车不能有效减速	II	0.8
			● 火车不能有效减速且发生安全事故	I	0.2

故障模式危害度与产品危害度

□ 故障模式危害度——评价单一故障模式危害性

■ $C_m(j) = \alpha \times \beta \times \lambda p \times t, \quad j = I, II, III, IV$

□ 产品危害度——评价产品的危害性

■ $C_r(j) = \sum C_{mi}(j), \quad i = 1, 2, \dots, n$

n 为该产品的故障模式总数, $j = I, II, III, IV$

■ $\sum C_{mi}(j)$ ——产品在第 j 类严酷度类别下的所有故障模式的危害度之和

某型军用教练飞机升降舵系统的FMECA

□ 系统定义

- 系统组成及功能
- 约定层次
- 绘制可靠性方框图
- 故障判据
- 严酷度类别

□ FMECA表的填写

- FMECA表格的选取
- FMECA表中信息来源
- 主要故障模式
- 系统在不同严酷度下的危害度

□ FMECA报告

系统定义

□ 系统组成及功能

- 某型军用教练飞机升降舵系统是单梁盒式薄壁结构，并是由梁、小梁、肋、蒙皮所组成的双闭室剖面结构。为保证升降舵系统的操作由负载、配平性能需要，还装有配重的调整片、翼尖配重。

□ 约定层次

- 初始约定层次为某型军用教练机
- 约定层次图

□ 绘制方框图

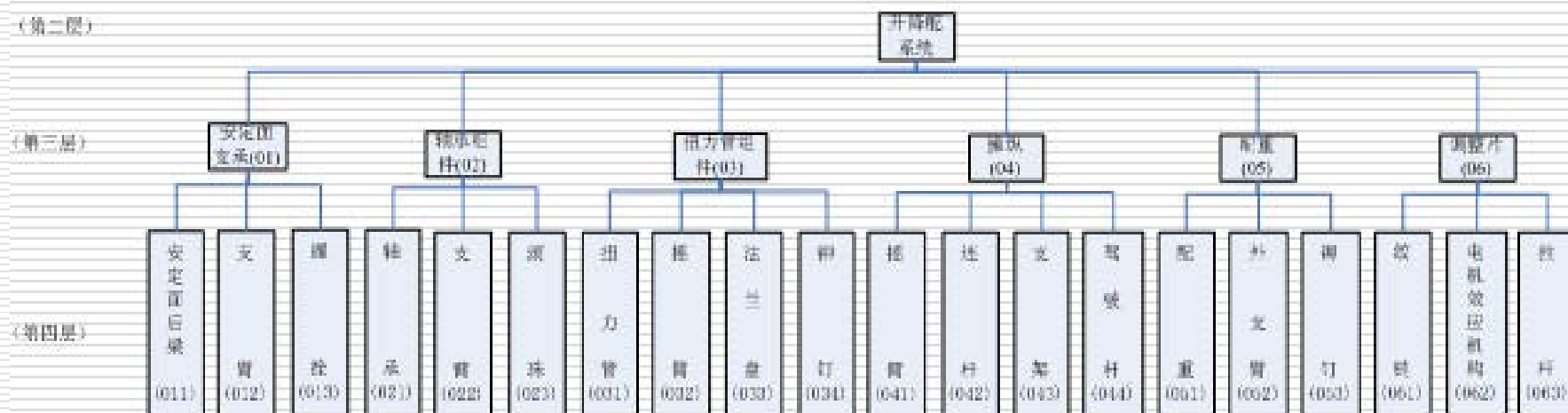
- 绘制功能结构方框图
- 绘制可靠性框图

□ 故障判据

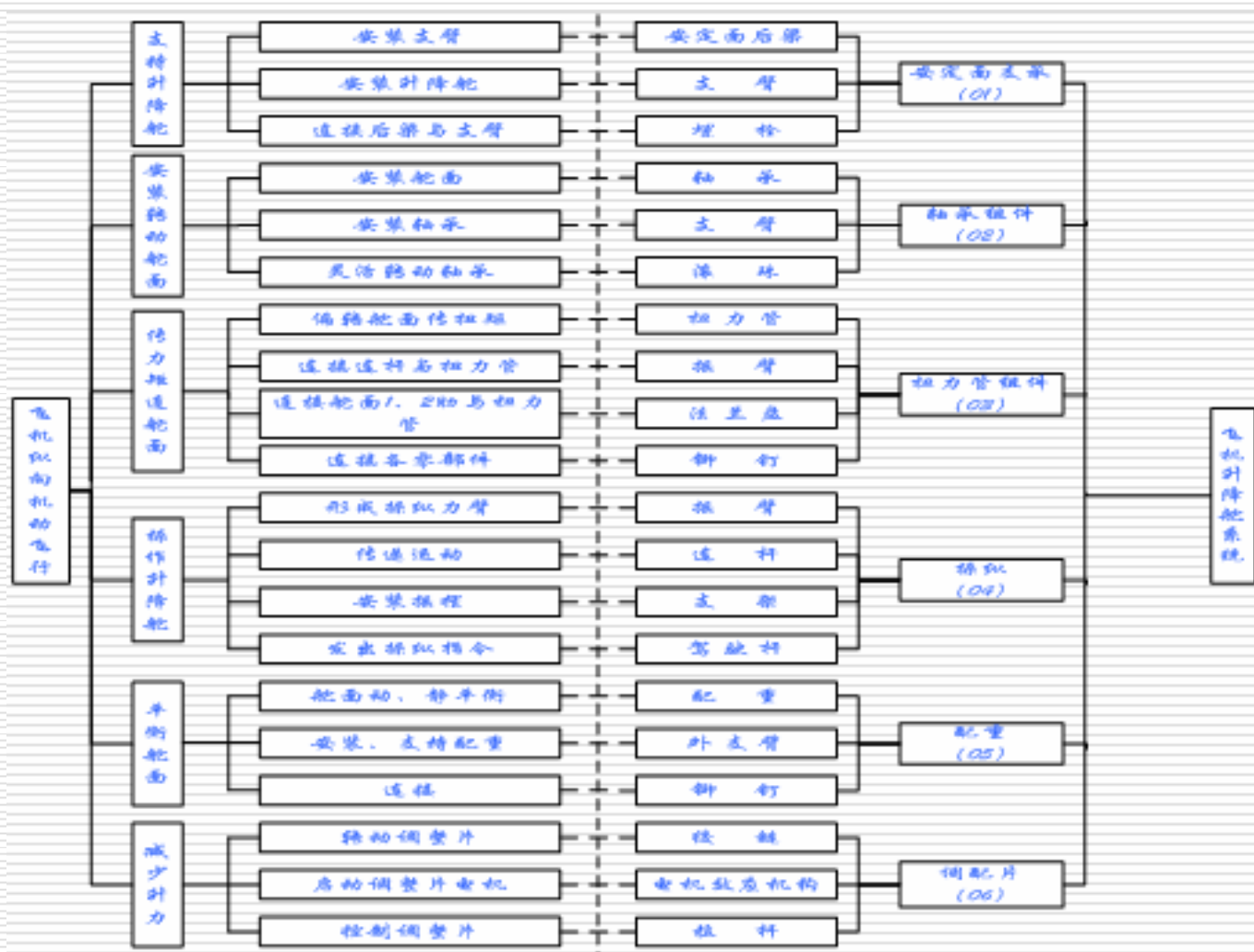
□ 严酷度类别



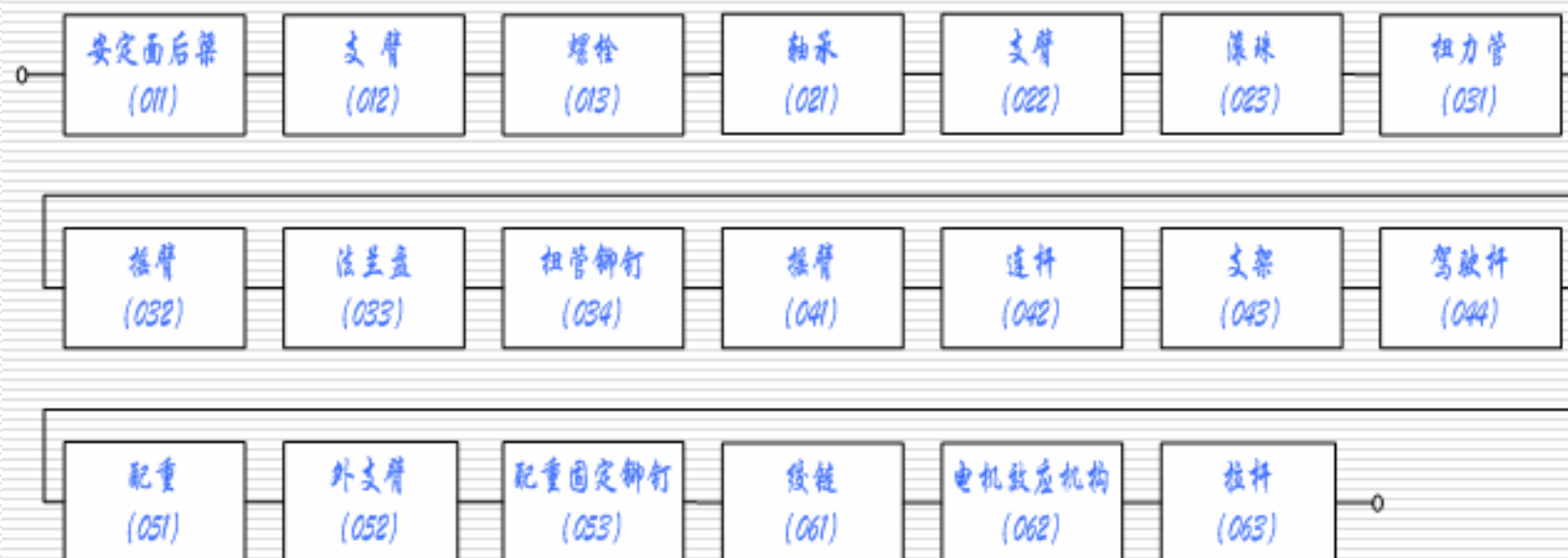
某型军用教练机升降舵系统约定层次



功能结构方框图



可靠性框图



故障判据

- 升降舵系统凡发生不满足以下要求的情况之一，即认为该系统发生了故障：
 - 舵面偏转时应准确及时偏转到规定位置；
 - 左、右升降舵应保持同步偏转；
 - 飞机长期稳定飞行时，舵面应保持确定的平衡位置；
 - 舵面偏转时无卡滞现象；
 - 飞行中舵面无强烈振动现象；
 - 调整片按要求能正常偏转；
 - 配重无松动现象；
 - 舵面结构满足了强度、刚度要求，没有因疲劳、腐蚀等导致其结构的损伤。



严酷度类别

升降舵系统严酷度类别的定义

严酷度类别	严重程度定义
I 类 (灾难的)	危及人员或安全 (如一等、二等飞行事故及重大环境损坏)
II 类 (致命的)	损伤人员或飞机损伤 (如三等飞行事故及严重环境损害)
III 类 (临界的)	人员轻度伤害或影响任务完成 (如误飞、中断或取消飞行、降低飞行品质、增加着陆困难、中等程度环境损害)
IV 类 (轻度的)	无影响或影响很小, 增加非计划性维护或修理

FMECA表格的填写

□ FMECA表格的选取

- 根据本案例的实际情况，将FMEA表、CA表合并成一个表。这使FMECA表更简明、直观和减少工作量。

□ FMECA表中信息来源

- 表中的故障模式、故障原因、故障率等均是在多个相似飞机升降舵的调研和分析基础上进行的，其结果比较真实可靠。

□ 主要故障模式——归纳该升降舵的故障模式是：

- 舵面偏转不到位。其表现为驾驶杆行程加大，操纵不到位。
- 舵面偏转困难（偏重），但无卡死现象。
- 卡滞。舵面转动不灵活，有卡滞现象。
- 振动。由舵面的振动导致驾驶杆抖动。
- 结构故障。由于长期使用，舵面结构局部损伤，造成结构强度、刚度下降，变形加大。

□ 针对上述故障模式提示了相应的改进措施，进而提高了产品的可靠性、保证了该教练机飞行一次成功。

□ 系统在不同严酷度下的危害度

- 据表结果，升降舵系统在不同严酷度下的危害度是：

- $CRs(I) = 6.001 \times 10^{-6}$; $CRs(II) = 31.6724 \times 10^{-6}$;
- $CRs(III) = 1.4183 \times 10^{-6}$; $CRs(IV) = 0.0252 \times 10^{-6}$

FMECA表格

初始约定层次: XX教练飞机

约定层次: 升降舵系统

任务: 飞行

分析: XXX

审核 XXX

批准: XXX

第1页 共2页

代 码	产 品 或 功 能 标 志	功 能	故障模 式	故障原 因	任务阶 段 与 工 作 方 式	故障影响			严 酷 度	故障 检测 方法	改进 补偿 措施	故障 率 λ 来 源	故障模式危害度					产 品 危 害 度($\times 10^{-6}$)
						局部影 响	高一 层 次 影响	最终影 响					α	β	λ ($\times 10^{-6}$)	t	$\alpha \beta \lambda$ ($\times 10^{-6}$)	
01	安定面支 承	支 承 降 升 舵	安定面 后梁变 形过大	刚度不	飞行时 偏移	安定面 后梁变 形 超过允 许范围	升降舵 转动卡 滞	损伤飞 机	II	无	增加安 定面与 升降舵 抗弯刚 度	统计	0.02	0.8	15.6	0.33	0.0824	II类: 0.0824
			支臂裂 纹	疲劳	飞行	故障征 候	故障征 候	影响任 务完成	III	目视 检查 或无 损探 伤	增加强 度	统计	0.49	0.1	15.6	0.33	0.252	III类: 0.252
			螺栓锈 蚀	长期 使用	飞行	故障征 候	影响很 小	无影响	IV	目视 检查	定期维 修、更 换	统计	0.49	0.01	15.6	0.33	0.0252	IV类: 0.0252
02	轴承 组件	安 装 转 动 舵 面	轴承间 隙过大	磨损	飞行	功能下 降	功能下 降	损伤飞 机	II	无	加强润 滑、定 期维 修及 更换	统计	0.8 9	0.8	79.91	0.33	18.776	I类: 2.611
			滚珠掉 出	磨损	飞行	散失功 能	散失功 能	危及飞 机安全	I	无	更换	统计	0.11	0.9	79.91	0.33	2.611	II类: 18.776

FMECA报告

- ☐ 可靠性关键产品清单
- ☐ I II类故障模式清单
- ☐ 单点故障模式清单
- ☐ 不可检测故障模式清单
- ☐ 危害性矩阵图等

谢谢大家

更多资讯，中国可靠性网 www.kekaoxing.com

