



中华人民共和国国家军用标准

FL 0102

GJB/Z 1391-2006

代替 GJB 1391-1992

故障模式、影响及危害性分析指南

Guide to failure mode, effects and criticality analysis

2006-05-17 发布

2006-10-01 实施

中国人民解放军总装备部 批准

目 次

前言	III
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和缩略语	1
3.1 术语	1
3.2 缩略语	2
4 一般要求	2
4.1 概述	2
4.2 FMECA 计划及有关工作	3
5 功能及硬件 FMECA	8
5.1 功能及硬件 FMECA 的目的	8
5.2 功能及硬件 FMECA 方法的比较	8
5.3 功能及硬件 FMECA 的步骤	8
5.4 功能及硬件 FMEA 的步骤与实施	9
5.5 功能及硬件危害性分析	13
5.6 功能及硬件 FMECA 的注意事项	17
6 软件 FMECA (SFMECA)	17
6.1 概述	17
6.2 嵌入式软件 FMECA 的目的与工作时机	18
6.3 嵌入式软件 FMECA 的步骤与实施	18
6.4 嵌入式软件 FMECA 的注意事项	22
7 损坏模式及影响分析 (DMEA)	22
7.1 DMEA 的目的与范围	22
7.2 DMEA 的步骤	22
7.3 DMEA 的实施	23
7.4 DMEA 的注意事项	24
8 过程 FMECA	25
8.1 概述	25
8.2 工艺 FMECA 的目的与步骤	25
8.3 工艺 FMECA 步骤的主要内容	25
8.4 工艺 FMECA 的实施	29
8.5 工艺 FMECA 的注意事项	29
附录 A (资料性附录) 功能 FMECA 的应用案例	31
附录 B (资料性附录) 硬件 FMECA 的应用案例	36
附录 C (资料性附录) 嵌入式软件 FMECA 的应用案例	40
附录 D (资料性附录) 工艺 FMECA 的应用案例	44
附录 E (资料性附录) FMECA 在维修性分析中的应用及案例	49
附录 F (资料性附录) FMECA 在安全性分析中的应用及案例	51

附录 G (资料性附录)	FMECA 在测试性分析中的应用及案例·····	54
附录 H (资料性附录)	FMECA 在保障性分析中的应用及案例·····	57
附录 I (资料性附录)	损坏模式及影响分析(DMEA)的应用案例·····	60

前 言

本指导性技术文件是 GJB 1391-1992《故障模式、影响及危害性分析程序》的修订版。修订后的版本除保留了硬件的故障模式及影响分析(FMEA)、危害性分析(CA)和损坏模式及影响分析(DMEA)等主要内容外,与原版本相比,主要有以下变更:

- a) 更名为《故障模式、影响及危害性分析指南》;
- b) 适用阶段由原来研制、生产和使用扩展为论证、方案、工程研制与定型、生产和使用;
- c) 将 FMECA 分为设计 FMECA (含功能 FMECA、硬件 FMECA、嵌入式软件 FMECA 和 DMEA) 和过程 FMECA 两类;
- d) 增补的内容主要有:
 - 1) 功能及硬件 FMECA 中危害性分析(CA)方法增补了风险优先数(RPN)方法;
 - 2) FMECA 工作的分工及职责;
 - 3) FMECA 工作评审;
 - 4) 嵌入式软件 FMECA 方法;
 - 5) 过程 FMECA 方法;
 - 6) 功能及硬件 FMECA、嵌入式软件 FMECA、过程 FMECA、DMEA,以及 FMECA 在可靠性(R)、维修性(M)、安全性(S)、测试性(T)和保障性(S)分析中的应用等 9 个案例。
- e) 每类 FMECA 方法均包括目的、步骤、实施及注意事项。

本指导性技术文件附录 A~附录 I 是资料性附录。

本指导性技术文件由中国人民解放军总装备部电子信息基础部提出。

本指导性技术文件起草单位:北京航空航天大学可靠性工程研究所、总装备部武器装备可靠性工程技术中心、航天科工集团公司 706 所。

本指导性技术文件主要起草人:康 锐、石荣德、王江山、姚绍华、宋晓秋、张建国、马 麟、郭霖瀚、张 虹、徐 萍、孙琳玲。

故障模式、影响及危害性分析指南

1 范围

本指导性技术文件规定了故障模式、影响及危害性分析(FMECA)的程序和方法,并给出了应用案例。

本指导性技术文件适用于产品在论证、方案、工程研制与定型、生产和使用等寿命周期各阶段开展FMECA工作。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本指导性技术文件的条款。凡注日期或版次的引用文件,其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本指导性技术文件,但提倡使用本指导性技术文件的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件,其最新版本适用于本指导性技术文件。

GB 7826 失效模式和效应分析(FMEA)程序

GB/T 11457 软件工程术语

GJB 451 可靠性维修性保障性术语

GJB 1378 装备预防性维修大纲的制定要求与方法

GJB/Z 299 电子设备可靠性预计手册

3 术语和缩略语

3.1 术语

GJB 451、GB/T 11457 确定的以及下列术语和定义适用于本指导性技术文件。

3.1.1 约定层次 **indenture levels**

根据 FMECA 的需要,按产品的功能关系或组成特点进行 FMECA 的产品所在的功能层次或结构层次。一般是从复杂到简单依次进行划分。

3.1.2 初始约定层次 **initial indenture level**

要进行 FMECA 总的、完整的产品所在的约定层次中的最高层次。它是 FMECA 最终影响的对象。

3.1.3 其他约定层次 **other indenture levels**

相继的约定层次(第二、第三、第四等),这些层次表明了直至较简单的组成部分的有顺序的排列。

3.1.4 最低约定层次 **lowest indenture level**

约定层次中最底层的产品所在的层次。它决定了 FMECA 工作深入、细致的程度。

3.1.5 设计改进措施 **corrective action in design**

针对某一故障模式,在设计和工艺上采取的消除/减轻故障影响或降低故障发生概率的改进措施。

3.1.6 使用补偿措施 **compensating provision in operation**

针对某一故障模式,为了预防其发生而采取维修措施,或一旦出现该故障模式后操作人员应采取的最恰当的补救措施。

3.1.7 危害性 **criticality**

对产品中每个故障模式发生的概率及其危害程度的综合度量。

3.1.8 危害性分析 **criticality analysis**

对产品中的每个故障模式发生的概率及其危害程度所产生的综合影响进行分析,以全面评价产品各

种可能出现的故障模式的影响。

3.1.9 严酷度 **severity**

故障模式所产生后果的严重程度。

3.1.10 风险优先数 **risk priority number**

产品某个故障模式的严酷度等级、故障模式的发生概率等级和故障模式的被检测难度等级的乘积；或表示为前两项等级的乘积。

3.1.11 单点故障 **single point failure**

引起产品的故障且没有冗余或替代的工作程序作为补救的故障。

3.1.12 损坏模式 **damage mode**

由于战斗损伤所造成损坏的表现形式。它一般描述损坏的情况。

3.1.13 损坏影响 **damage effects**

损坏模式对武器装备或其他部件的使用、功能或状态所导致的后果。

3.1.14 易损性 **vulnerability**

在敌对环境下、执行任务过程中，产品能经受由于遭受了一定程度的威胁机理而引起的性能下降的能力。

3.1.15 威胁机理 **threat mechanism**

在战场环境下，由于敌方攻击或攻击敌方行动而引起的产品损坏的所有可能条件或条件组合。

3.2 缩略语

ATE	自动测试设备
BIT	机内测试
CA	危害性分析
CSCI	计算机软件配置项
DMEA	损坏模式及影响分析
ESR	影响严酷度等级
ETA	事件树分析
FMEA	故障模式及影响分析
FMECA	故障模式、影响及危害性分析
FTA	故障树分析
HWCI	硬件技术状态项目
IRS	软/硬件接口要求规格说明
LORA	修理级别分析
LRU	现场可更换单元
OPR	发生概率等级
PFMECA	过程故障模式、影响及危害性分析
RPN	风险优先数
SCA	嵌入式软件危害性分析
SDDR	软件故障模式被检测难度等级
SESR	软件故障模式影响严酷度等级
SFMECA	软件故障模式、影响及危害性分析
SOPR	软件故障模式发生概率等级

4 一般要求

4.1 概述

FMECA 是分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响,并按每个故障模式产生影响的严重程度及其发生概率予以分类的一种归纳分析方法,是属于单因素的分析方法。

FMECA 由故障模式及影响分析(FMEA)、危害性分析(CA)两部分组成。只有在进行 FMEA 基础上,才能进行 CA。

FMECA 是产品可靠性分析的一个重要的工作项目,也是开展维修性分析、安全性分析、测试性分析和保障性分析的基础。

在产品寿命周期各阶段,采用 FMECA 的方法及目的略有不同,见表 1。虽然各个阶段 FMECA 的形式不同,但根本目的均是从不同角度发现产品的各种缺陷与薄弱环节,并采取有效的改进和补偿措施以提高其可靠性水平。

表 1 在产品寿命周期各阶段的 FMECA 方法

阶段	方法	目的
论证、方案阶段	功能 FMECA	分析研究产品功能设计的缺陷与薄弱环节,为产品功能设计的改进和方案的权衡提供依据
工程研制与定型阶段	<ul style="list-style-type: none"> ● 功能 FMECA ● 硬件 FMECA ● 软件 FMECA ● 损坏模式及影响分析(DMEA) ● 过程 FMECA 	分析研究产品硬件、软件、生产工艺和生存性与易损性设计的缺陷与薄弱环节,为产品的硬件、软件、生产工艺和生存性与易损性设计的改进提供依据
生产阶段	过程 FMECA	分析研究产品的生产工艺的缺陷和薄弱环节,为产品生产工艺的改进提供依据
使用阶段	<ul style="list-style-type: none"> ● 硬件 FMECA ● 软件 FMECA ● 损坏模式及影响分析(DMEA) ● 过程 FMECA 	分析研究产品使用过程中可能或实际发生的故障、原因及其影响,为提高产品使用可靠性,进行产品的改进、改型或新产品的研制以及使用维修决策等提供依据

产品的设计 FMECA 工作应与产品的设计同步进行。产品在论证与方案阶段、工程研制阶段的早期主要考虑产品的功能组成,对其进行功能 FMECA;当产品在工程研制阶段、定型阶段,主要是采用硬件(含 DMEA)、软件的 FMECA。随着产品设计状态的变化,应不断更新 FMECA,以及时发现设计中的薄弱环节并加以改进。

过程 FMECA 是产品生产工艺中运用 FMECA 方法的分析工作,它应与工艺设计同步进行,以及时发现工艺实施过程中可能存在的薄弱环节并加以改进。

在产品使用阶段,利用使用中的故障信息进行 FMECA,以及时发现使用中的薄弱环节并加以纠正。

4.2 FMECA 计划及有关工作

4.2.1 FMECA 计划

FMECA 计划包括为实现本标准规定的要求,并随着设计的更改适时地进行 FMECA,以及利用分析结果为设计提供实施本标准所需的全部工作。它可作为技术协议和技术合同的一部分,并为订购方监督与评价承制方开展 FMECA 工作提供依据。

在 FMECA 计划中,规定了产品寿命周期不同阶段所选用的 FMECA 方法、表格格式、定义约定层次、编码体系、任务描述、故障判据、严酷度类别、所需的主要信息(输入要求)、FMECA 报告(输出结果)、评审、职责与分工等主要内容,并包括完成 FMECA 工作的步骤、实施和工作进度要求等。FMECA 计划应与产品可靠性、维修性、安全性、测试性、保障性等工作要求、以及有关标准要求相互协调、统筹安排。

4.2.2 FMECA 方法的选取

根据产品寿命周期不同阶段的需求,按照表 1 的内容选用不同的 FMECA 方法,并针对被分析对象

的技术状态、信息量等情况，选取一种或多种 FMECA 方法进行分析。

4.2.3 FMECA 表的格式

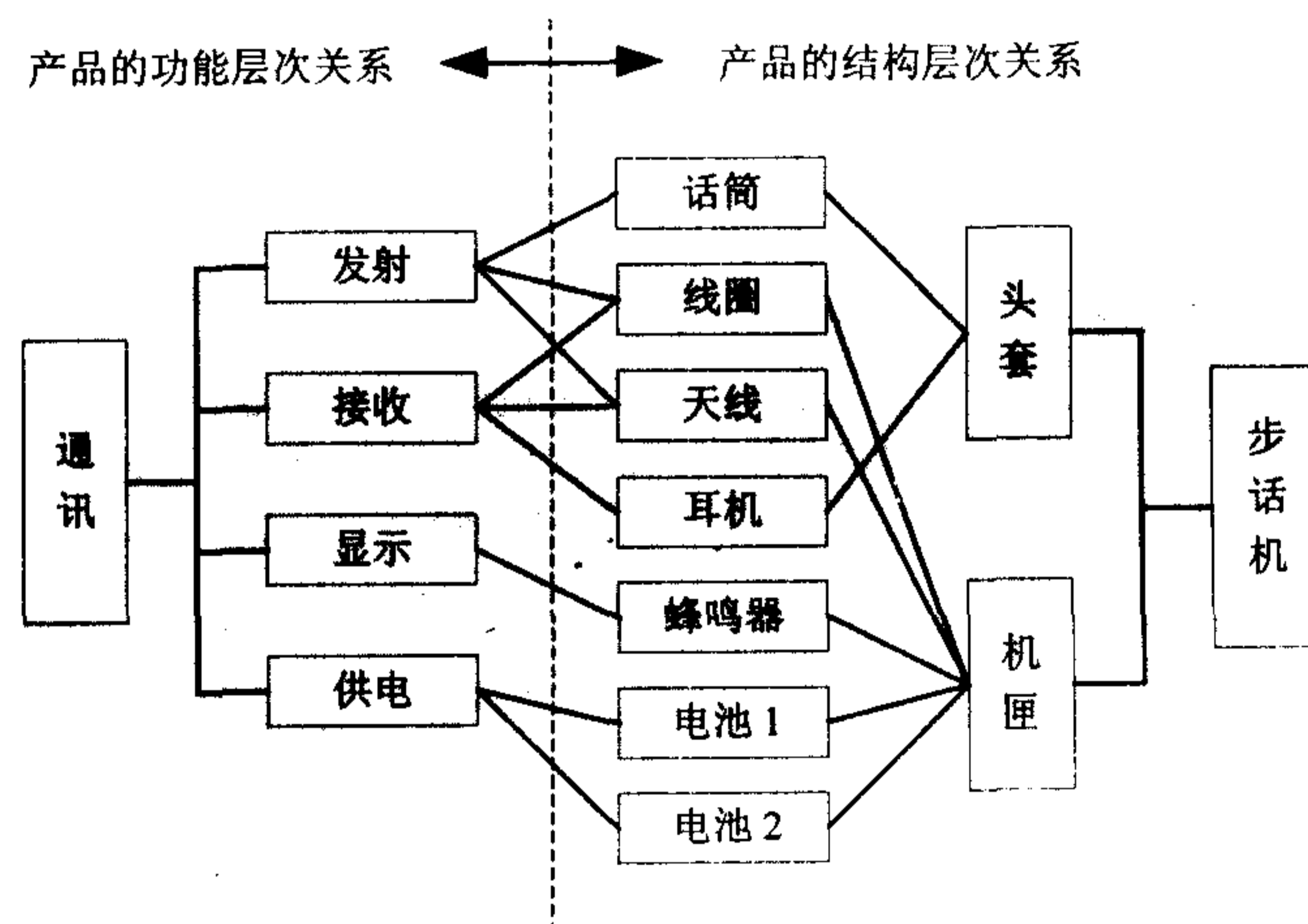
根据表 1 的内容选用不同的 FMECA 方法，对产品“功能及硬件故障模式及影响分析(FMEA)表”、“危害性分析(CA)表”分别选用表 11、表 16；对“嵌入式软件 FMECA 表”选用表 22，对“损坏模式及影响分析(DMEA)表”选用表 23；对“工艺 FMECA 表”选用表 34。其注意事项是：FMECA 表可按被分析对象实际情况进行综合、选取、增删，例如 FMEA 表和 CA 表可合并为 FMECA 表(如表 A.2 等)。

4.2.4 定义约定层次

在对产品实施设计 FMECA 时，应明确分析对象，即明确约定层次的定义；对过程 FMECA 时，可采用产品工艺流程各个环节作为分析对象，考虑工艺中可能发生的缺陷对下一道工序、被加工产品或最终产品的影响。

4.2.4.1 功能及硬件 FMECA 中约定层次的划分

约定层次既可以按产品的功能层次关系定义，又可按产品的硬件结构层次关系定义。具体选用何种约定层次划分方法，将取决于分析中所选用的 FMECA 方法。当选用功能 FMECA 方法时，应针对产品的功能层次关系划分约定层次；当选用硬件 FMECA 方法时，应针对产品的硬件结构层次关系划分约定层次，示例见图 1。



注：若进行功能 FMECA，则从图中的虚线向左进行分析；若进行硬件 FMECA，则从图中的虚线向右进行。

图 1 某步话机的功能层次与结构层次划分的对应关系图

4.2.4.2 划分约定层次的注意事项

主要包括：

- 在 FMECA 中的约定层次，划分为“初始约定层次”、“约定层次”和“最低约定层次”。例如某型战斗机液压系统约定层次划分的示例见图 2；
- 当分析复杂产品时，应按装备研制的总体单位和配套单位的技术责任关系明确各自开展 FMECA 的产品范围。装备总体单位首先应将研制的装备定义为初始约定层次，并对其他配套研制单位提出最低约定层次的划分原则。约定层次划分得越多越细，FMECA 的工作量就越大；
- 对于采用了成熟设计、继承性较好且经过了可靠性、维修性和安全性等良好验证的产品，其约定层次可划分得少而粗；反之，可划分得多而细；
- 在确定最低约定层次时，可参照约定的或预定维修级别上的产品层次(如维修可更换单元)；
- 每个约定层次的产品应有明确定义(包括功能，故障判据等)，当约定层次的级数较多(一般大于 3 级)时，应从下至上按约定层次的级别不断分析，直至初始约定层次相邻的下一个层次为止，进而构成完整产品的 FMECA。

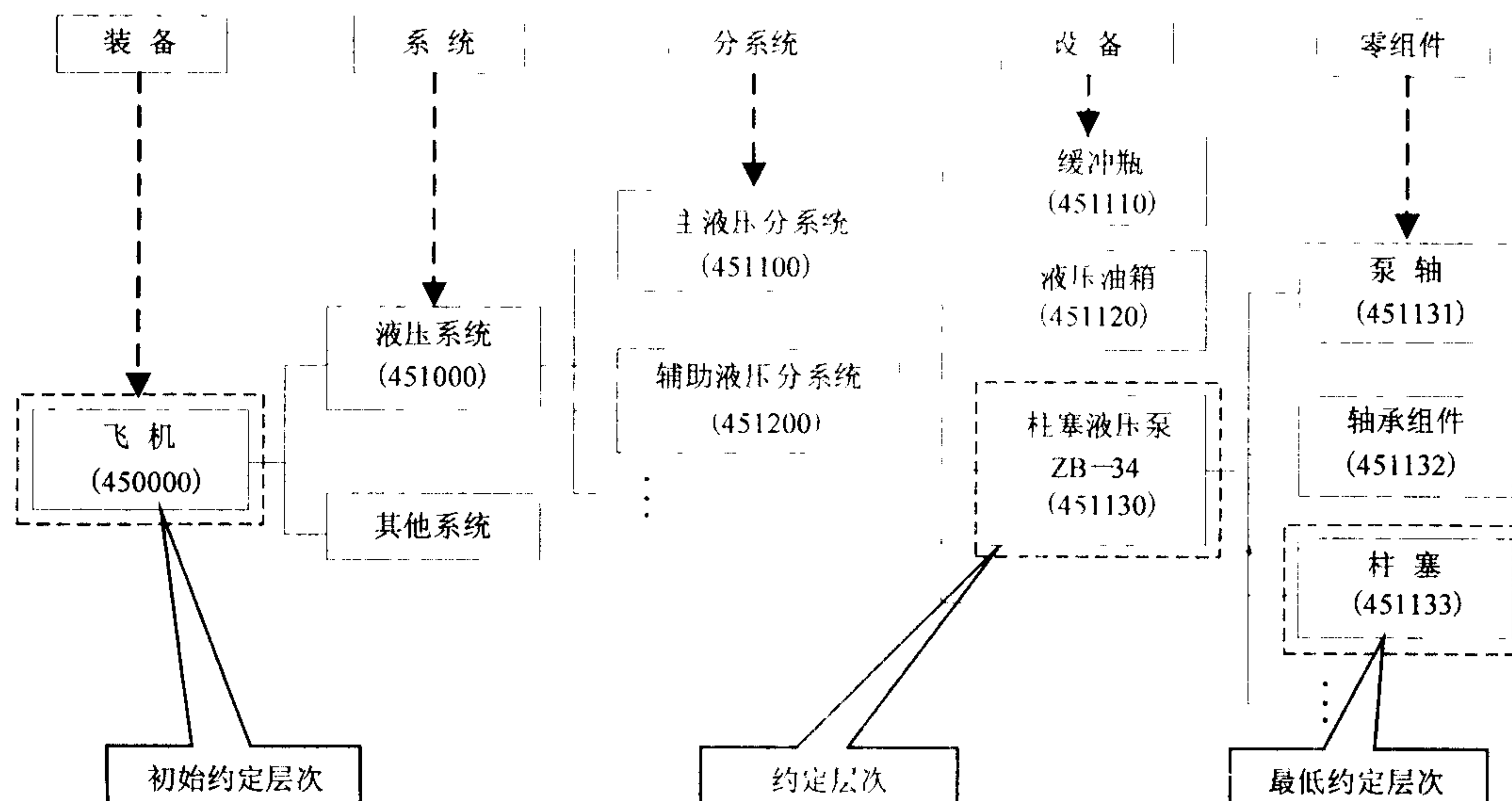


图2 某型战斗机液压系统约定层次划分的示例

4.2.5 制订编码体系

为了对产品的每个故障模式进行统计、分析、跟踪和反馈，应根据产品的功能及结构分解或所划分的约定层次，制定编码体系。其注意事项是：编码体系应符合产品功能及结构层次的上、下级关系；能体现约定层次的上、下级关系，与产品的功能框图和可靠性框图相一致；符合或采用有关标准或文件的要求；对产品各组成部分应具有唯一、简明和适用等特性；与产品的规模相一致，并具有一定的可追溯性。

4.2.6 描述产品的任务

在 FMECA 工作中应对产品完成任务的要求及其环境条件进行描述，这种描述一般用任务剖面来表示。任务剖面是指产品在完成规定任务时间内所经历的事件和环境的时序的描述，示例见图 3。

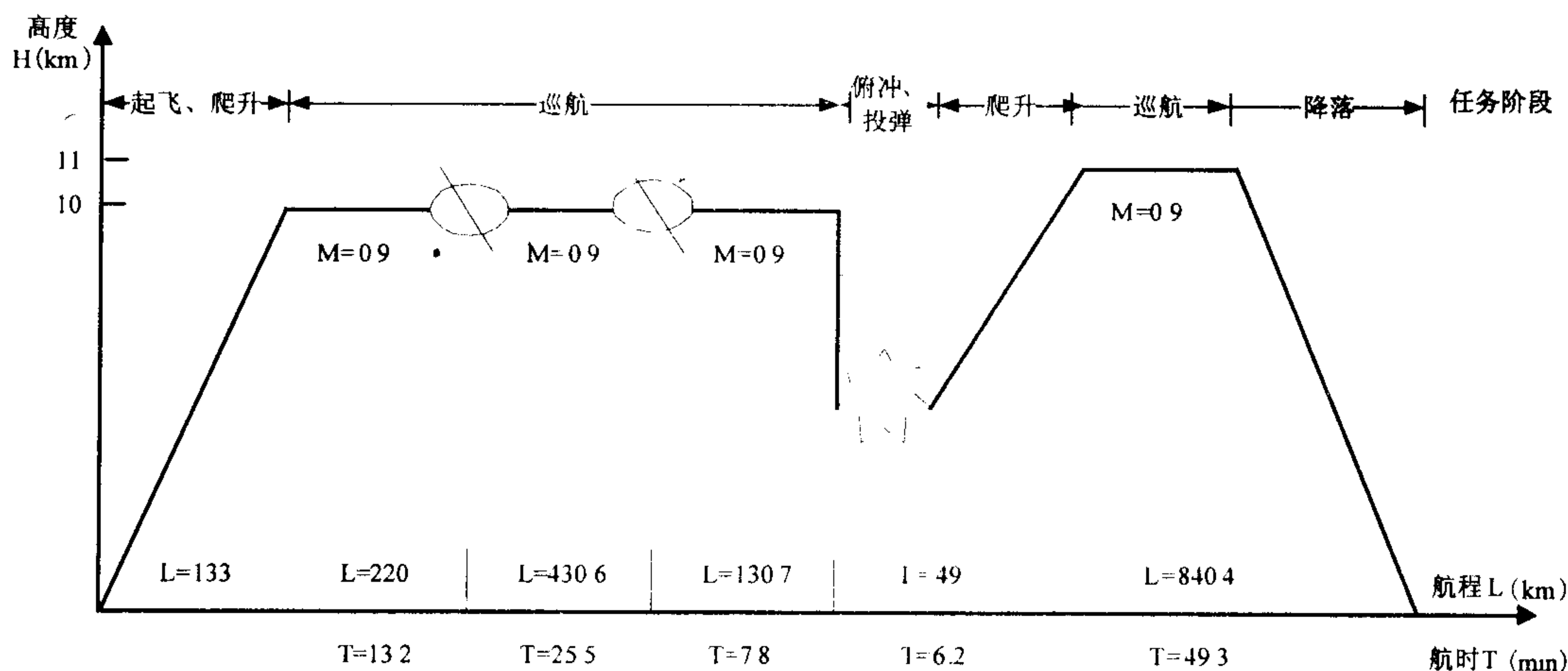


图3 某型战斗机的飞行任务剖面示意

若被分析的产品存在多个任务剖面，则应对每个任务剖面分别进行描述；若被分析的产品的每一个任务剖面又由多个任务阶段组成，且每一个任务阶段，又可能有不同的工作方式，则对此情况均需进行说明或描述(图3中M为马赫数)。

4.2.7 定义故障判据

4.2.7.1 定义故障判据的依据

故障判据的依据如下：

- 产品在规定的条件下和规定时间内，不能完成规定的功能；

的技术状态、信息量等情况，选取一种或多种 FMECA 方法进行分析。

4.2.3 FMECA 表的格式

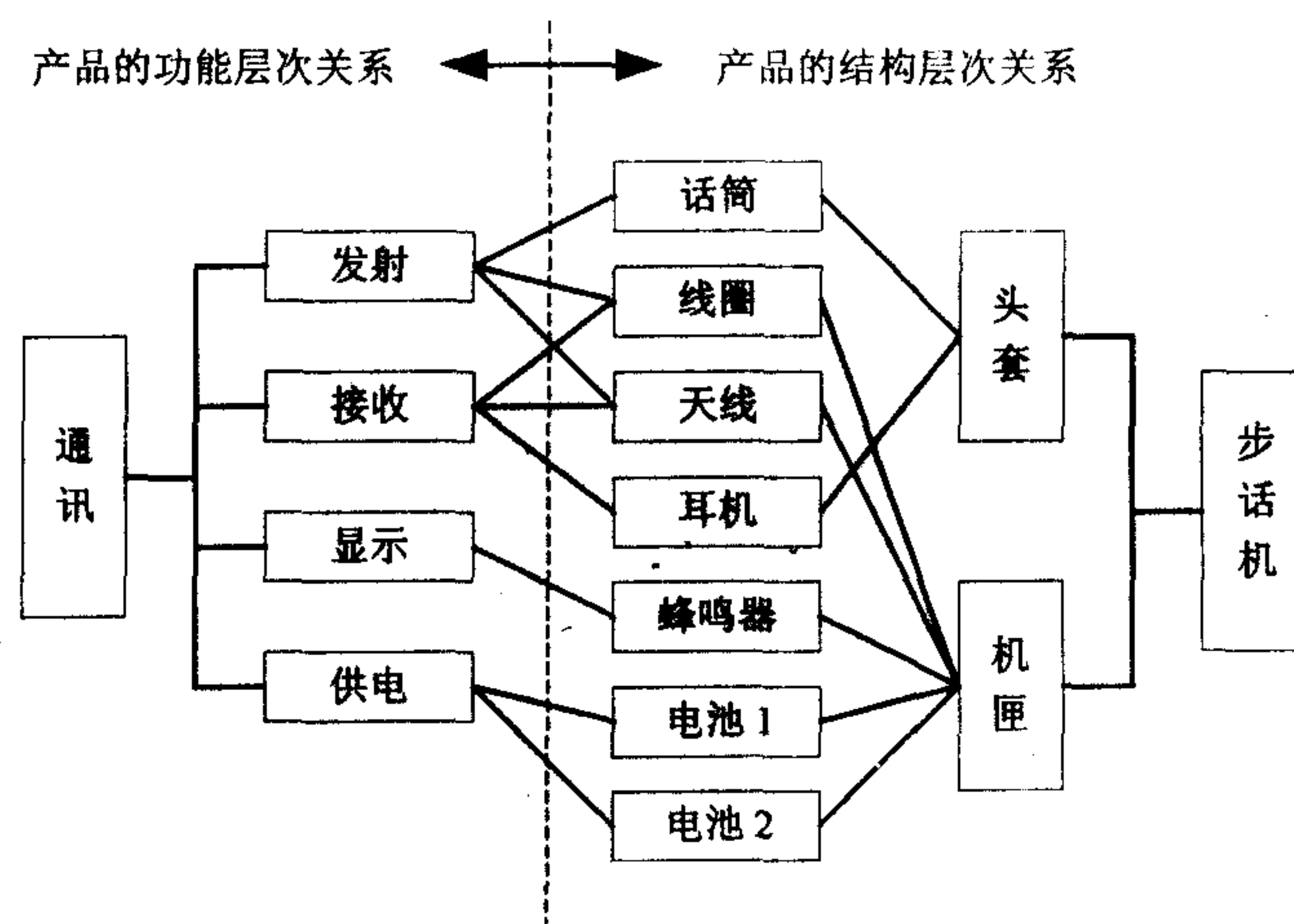
根据表 1 的内容选用不同的 FMECA 方法，对产品“功能及硬件故障模式及影响分析(FMEA)表”、“危害性分析(CA)表”分别选用表 11、表 16；对“嵌入式软件 FMECA 表”选用表 22，对“损坏模式及影响分析(DMEA)表”选用表 23；对“工艺 FMECA 表”选用表 34。其注意事项是：FMECA 表可按被分析对象实际情况进行综合、选取、增删，例如 FMEA 表和 CA 表可合并为 FMECA 表(如表 A.2 等)。

4.2.4 定义约定层次

在对产品实施设计 FMECA 时，应明确分析对象，即明确约定层次的定义；对过程 FMECA 时，可采用产品工艺流程各个环节作为分析对象，考虑工艺中可能发生的缺陷对下一道工序、被加工产品或最终产品的影响。

4.2.4.1 功能及硬件 FMECA 中约定层次的划分

约定层次既可以按产品的功能层次关系定义，又可按产品的硬件结构层次关系定义。具体选用何种约定层次划分方法，将取决于分析中所选用的 FMECA 方法。当选用功能 FMECA 方法时，应针对产品的功能层次关系划分约定层次；当选用硬件 FMECA 方法时，应针对产品的硬件结构层次关系划分约定层次，示例见图 1。



注：若进行功能 FMECA，则从图中的虚线向左进行分析；若进行硬件 FMECA，则从图中的虚线向右进行。

图 1 某步话机的功能层次与结构层次划分的对应关系图

4.2.4.2 划分约定层次的注意事项

主要包括：

- 在 FMECA 中的约定层次，划分为“初始约定层次”、“约定层次”和“最低约定层次”。例如某型战斗机液压系统约定层次划分的示例见图 2；
- 当分析复杂产品时，应按装备研制的总体单位和配套单位的技术责任关系明确各自开展 FMECA 的产品范围。装备总体单位首先应将研制的装备定义为初始约定层次，并对其他配套研制单位提出最低约定层次的划分原则。约定层次划分得越多越细，FMECA 的工作量就越大；
- 对于采用了成熟设计、继承性较好且经过了可靠性、维修性和安全性等良好验证的产品，其约定层次可划分得少而粗；反之，可划分得多而细；
- 在确定最低约定层次时，可参照约定的或预定维修级别上的产品层次(如维修可更换单元)；
- 每个约定层次的产品应有明确定义(包括功能，故障判据等)，当约定层次的级数较多(一般大于 3 级)时，应从下至上按约定层次的级别不断分析，直至初始约定层次相邻的下一个层次为止，进而构成完整产品的 FMECA。

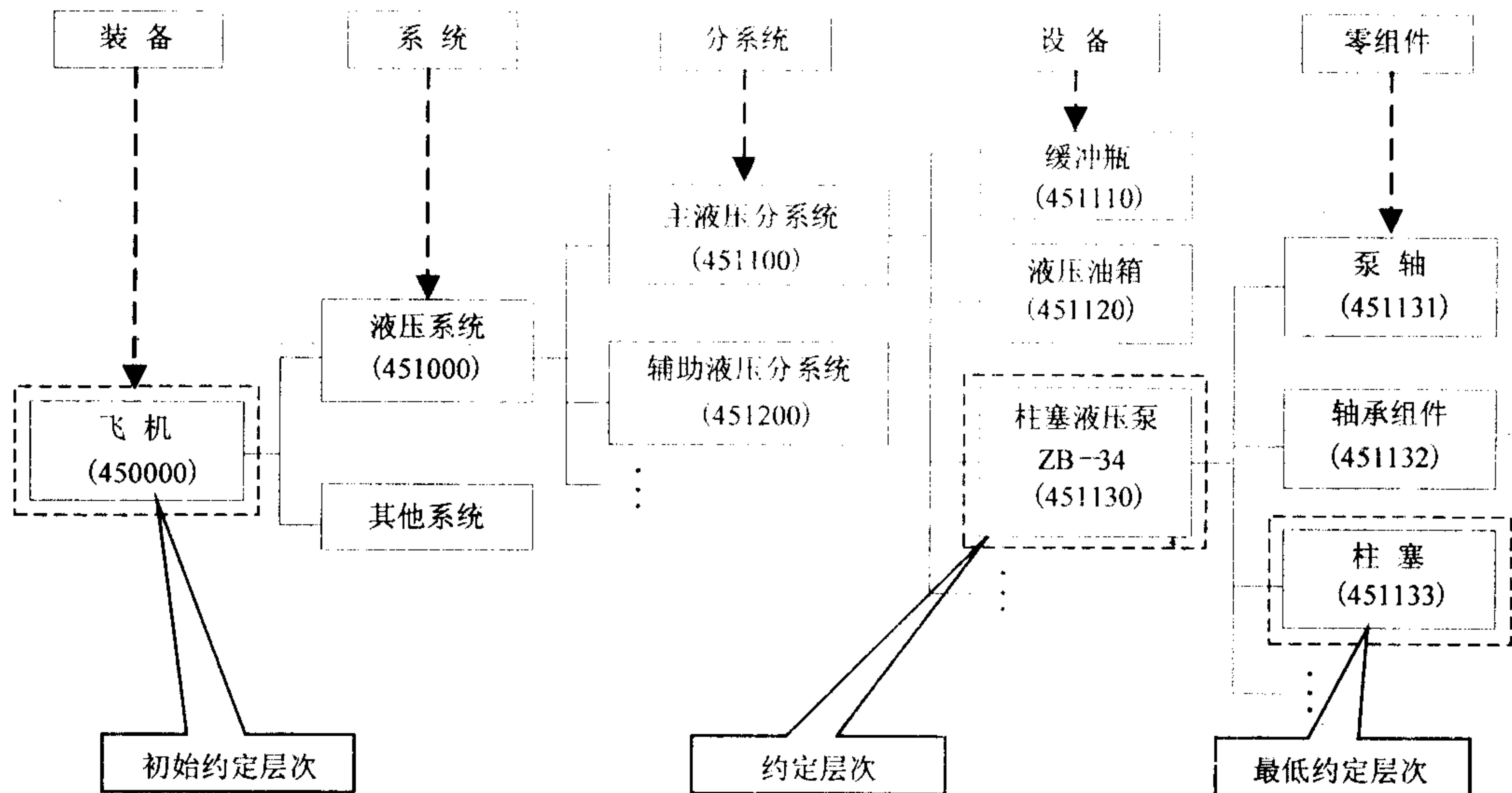


图2 某型战斗机液压系统约定层次划分的示例

4.2.5 制订编码体系

为了对产品的每个故障模式进行统计、分析、跟踪和反馈，应根据产品的功能及结构分解或所划分的约定层次，制定编码体系。其注意事项是：编码体系应符合产品功能及结构层次的上、下级关系；能体现约定层次的上、下级关系，与产品的功能框图和可靠性框图相一致；符合或采用有关标准或文件的要求；对产品各组成部分应具有唯一、简明和适用等特性；与产品的规模相一致，并具有一定的可追溯性。

4.2.6 描述产品的任务

在 FMECA 工作中应对产品完成任务的要求及其环境条件进行描述，这种描述一般用任务剖面来表示。任务剖面是指产品在完成规定任务时间内所经历的事件和环境的时序的描述，示例见图 3。

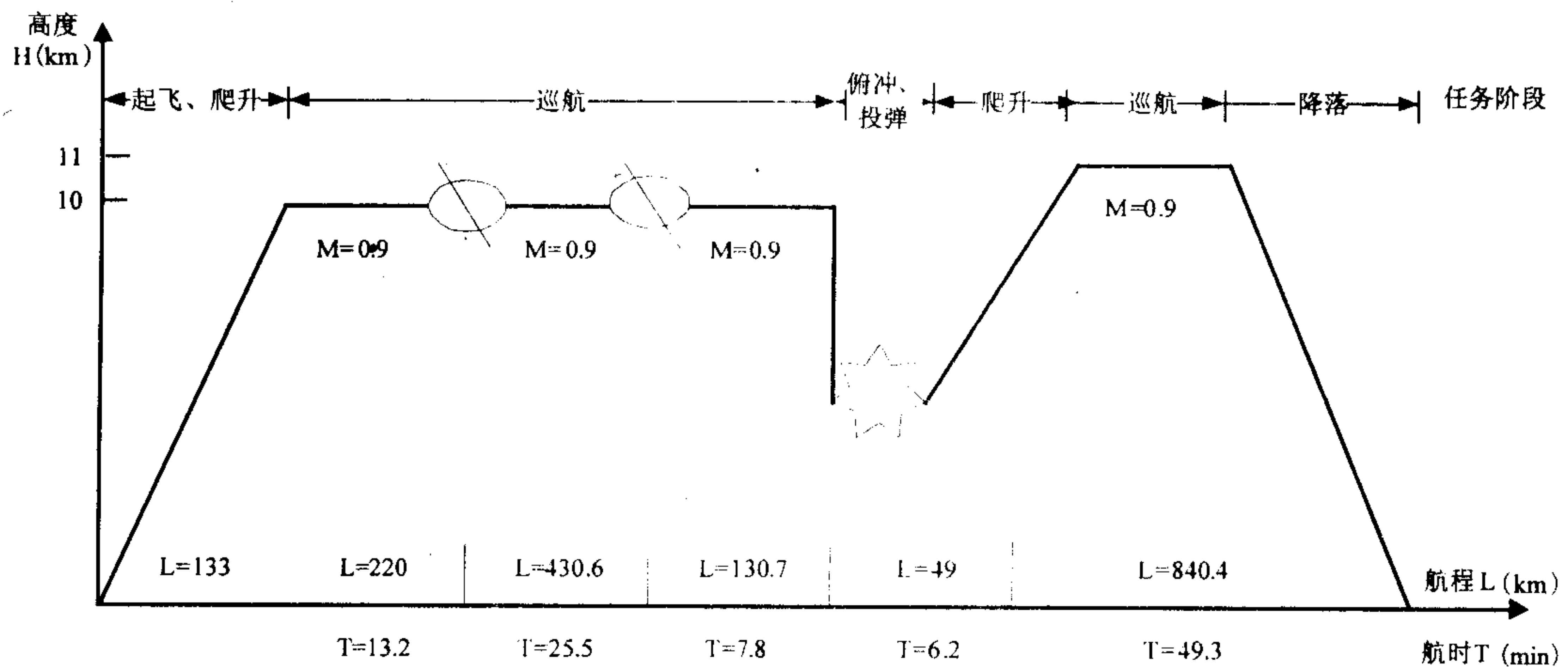


图3 某型战斗机的飞行任务剖面示意

若被分析的产品存在多个任务剖面，则应对每个任务剖面分别进行描述；若被分析的产品的每一个任务剖面又由多个任务阶段组成，且每一个任务阶段，又可能有不同的工作方式，则对此情况均需进行说明或描述（图 3 中 M 为马赫数）。

4.2.7 定义故障判据

4.2.7.1 定义故障判据的依据

故障判据的依据如下：

- 产品在规定的条件下和规定时间内，不能完成规定的功能；

- b) 产品在规定的条件下和规定时间内, 某些性能指标不能保持在规定的范围内;
- c) 产品在规定的条件下和规定时间内, 引起对人员、环境、能源和物资等方面的影响超出了允许范围;
- d) 技术协议或其他文件规定的故障判据。

4.2.7.2 定义故障判据的原则

故障判据是判别产品故障的界限。它一般是由承制方和订购方共同根据产品的功能、性能指标、使用环境等允许极限进行确定的。

4.2.7.3 定义故障判据的注意事项

应对产品的组成、功能及技术要求和进行 FMECA 工作的目的等有清晰地理解, 进而针对特定产品准确地给出故障判据的具体内容(包含功能界限和性能界限等), 以避免 FMECA 工作的随意性和模糊性。

4.2.8 定义严酷度类别

4.2.8.1 严酷度类别的划分

在进行故障影响分析之前, 应对故障模式的严酷度类别(或等级)进行定义。它是根据故障模式最终可能出现的人员伤亡、任务失败、产品损坏(或经济损失)和环境损害等方面的影响程度进行确定的。武器装备常用的严酷度类别的定义见表 2。

表 2 武器装备常用的严酷度类别及定义

严酷度类别	严重程度定义
I类(灾难的)	引起人员死亡或产品(如飞机、坦克、导弹及船舶等)毁坏、重大环境损害
II类(致命的)	引起人员的严重伤害或重大经济损失或导致任务失败、产品严重损坏及严重环境损害
III类(中等的)	引起人员的中等程度伤害或中等程度的经济损失或导致任务延误或降级、产品中中等程度的损坏及中等程度环境损害
IV类(轻度的)	不足以导致人员伤害或轻度的经济损失或产品轻度的损坏及环境损害, 但它会导致非计划性维护或修理

4.2.8.2 定义严酷度类别的注意事项

主要包括:

- a) 严酷度类别仅是按故障模式造成的最坏的潜在后果进行确定的;
- b) 严酷度类别仅是按故障模式对“初始约定层次”的影响程度进行确定的;
- c) 严酷度类别划分有多种方法, 但对同一产品进行 FMECA 时, 其定义应保持一致。

4.2.9 FMECA 所需的主要信息

4.2.9.1 FMECA 所需的主要信息的来源

FMECA 所需的主要信息来源见表 3。

表 3 FMECA 所需的主要信息

序号	信息来源	从信息来源中可获取 FMECA 所属的主要信息	所获信息的作用
1	技术规范与研制方案	a) 从设计技术规范和研制方案中获取: 产品的性能任务及任务阶段、环境条件、工作原理、结构组成、试验和使用要求等	a) 可以确定 FMECA 工作的深度和广度; b) 为设计 FMECA 工作提供支持
		b) 从生产工艺技术规范中获取: 生产过程流程、工序目的和要求等	为过程 FMECA 工作提供支持
2	设计图样及有关资料	a) 从设计图样可获取初始约定层次产品直至最低约定层次产品的结构、接口关系等信息; b) 从生产工艺设计资料获得生产过程流程说明、过程特性矩阵以及相关工艺设计、工艺规程等信息	在设计初期的工作原理图可进行功能 FMECA; 详细设计图样为硬件及软件 FMECA、DMEA 提供支持; 生产工艺设计资料为进行过程 FMECA 提供支持

表 3(续)

序号	信息来源	从信息来源中可获取 FMECA 所属的主要信息	所获信息的作用
3	可靠性设计分析及试验	a) 从产品可靠性设计分析及试验资料中获取故障信息或数据；当无试验数据时，可从某些标准、手册、资料中(如 GJB/Z 299《电子设备可靠性预计手册》)和软件测试中获取故障信息或数据	为设计 FMECA 的定性、定量分析提供支持
		b) 从生产工艺，可获包括生产过程中的故障模式、影响及风险结果	为过程 FMECA 进行定性、定量分析提供支持
4	过去的经验、相似产品的信息	a) 从产品在使用维修中获取：检测周期、预防维修工作要求、可能出现的硬件、软件故障模式(含损坏模式)、设计改进或使用补偿措施等； b) 从相似产品中获取有关 FMECA 信息	为设计 FMECA、过程 FMECA 工作的开展提供支持

4.2.9.2 所需主要信息的注意事项

应全面而广泛地收集、分析、整理有关被分析对象的相关资料，以作为进行 FMECA 信息输入。

4.2.10 FMECA 工作的分工及职责

FMECA 工作应由产品设计人员或工艺设计人员完成，即“谁设计、谁分析”。可靠性专业人员应协助设计人员完成分析工作，提供实施 FMECA 的程序、方法，并进行指导与会签。应明确装备总体单位和配套单位之间的工作接口关系。FMECA 工作应分工明确，责任到人，严格实行岗位责任制。

4.2.11 FMECA 报告

FMECA 报告的主要内容：

- a) 概述——实施 FMECA 的目的、产品所处的寿命周期阶段、分析任务的来源等基本情况；实施 FMECA 的前提条件和基本假设的有关说明；编码体系、故障判据、严酷度定义、FMECA 方法的选用说明；FMECA、CA 表选用说明；分析中使用的数据来源说明；其他有关解释和说明等；
- b) 产品的功能原理——被分析产品的功能原理和工作说明，并指明本次分析所涉及的系统、分系统及其相应的功能，并进一步划分出 FMECA 的约定层次；
- c) 系统定义——被分析产品的功能分析、绘制功能框图和任务可靠性框图；
- d) 填写的 FMEA、CA 表的汇总及说明；
- e) 结论与建议——除阐述结论外，对无法消除的严酷度为 I、II 类单点故障模式或严酷度为 I、II 类故障模式的必要说明，对其他可能的设计改进措施和使用补偿措施的建议、以及预计执行措施后的效果说明；
- f) FMECA 清单——根据 FMECA 表的结果确定：“严酷度 I、II 类单点故障模式清单”见表 4、“可靠性关键重要产品清单”见表 5；
- g) 附件——FMEA、CA 表；危害性矩阵图等。

上述内容可剪裁，视情而定。

表 4 严酷度 I、II 类单点故障模式清单

系统名称		填表 校对		审核 批准		第 页·共 页 填表日期		
序号	产品名称	故障模式	最终故障影响	严酷度等级	设计改进措施	使用补偿措施	故障模式未被消除原因	备注

表5 可靠性关键重要产品清单

系统名称		填表 校对		审核 批准		第 页·共 页 填表日期			
序号	产品名称	关键 故障模式	最终故障 影响	严酷度 等级	设计改 进措施	使用补 偿措施	实施 部门	实施 情况	备注

4.2.12 FMECA 的评审

应对 FMECA 的结果和报告进行评审。评审可结合产品研制转阶段节点评审或其他技术评审进行，也可以进行 FMECA 单项评审。

FMECA 是有效的可靠性分析方法，但在分析过程、评审中还应与其他可靠性分析方法相结合，例如与故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)等方法相结合。

5 功能及硬件 FMECA

5.1 功能及硬件 FMECA 的目的

功能及硬件 FMECA 的目的是：找出产品在功能及硬件设计中所有可能的故障模式、原因及影响，并针对其薄弱环节，提出设计改进和使用补偿措施。

5.2 功能及硬件 FMECA 方法的比较

功能及硬件 FMECA 方法的综合比较见表 6。具体选用何种分析方法视情而定。

5.3 功能及硬件 FMECA 的步骤

FMECA 是由故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)所组成。CA 是对 FMEA 的补充和扩展，只有先进行 FMEA，才能进行 CA。

表6 功能及硬件 FMECA 分析方法的综合比较

序号	项目	功能 FMECA	硬件 FMECA
1	内涵	根据产品的每个功能故障模式，对各种可能导致该功能故障模式的原因及其影响进行分析。使用该方法时，应将输出功能一一列出	根据产品的每个硬件故障模式，对各种可能导致该硬件故障模式的原因及其影响进行分析
2	使用条件及时机	产品的构成尚不确定或不完全确定时，采用功能 FMECA。一般用于产品的论证、方案阶段或工程研制阶段早期	产品设计图纸及其他工程设计资料已确定。一般用于产品的工程研制阶段
3	适用范围	一般从“初始约定层次”产品向下分析，即自上而下的分析，也可从产品任一功能级开始向任一方向进行分析	一般从元器件级直至装备级，即自下而上的分析，也可从任一层次产品开始向任一方向进行分析
4	分析人员需掌握的资料	<ul style="list-style-type: none"> ● 产品及功能故障的定义； ● 产品功能框图； ● 产品工作原理； ● 产品边界条件及假设，等等 	<ul style="list-style-type: none"> ● 产品的全部原理及其相关资料(例如原理图、装配图等)； ● 产品的层次定义； ● 产品的构成清单及元器件、零组件、材料明细表，等等
5	特点	相似点	其结果可获得产品“严酷度 I、II 类功能故障模式清单”、“关键功能项目清单”等
		优点	分析相对比较简单
		缺点	可能忽略某些功能故障模式
			其结果可获得产品“严酷度 I、II 类单点故障模式清单”、“可靠性关键重要产品清单”等
			分析比较严格，应用较广泛
			需有产品设计图及其他设计资料

功能及硬件 FMECA 的步骤见图 4。

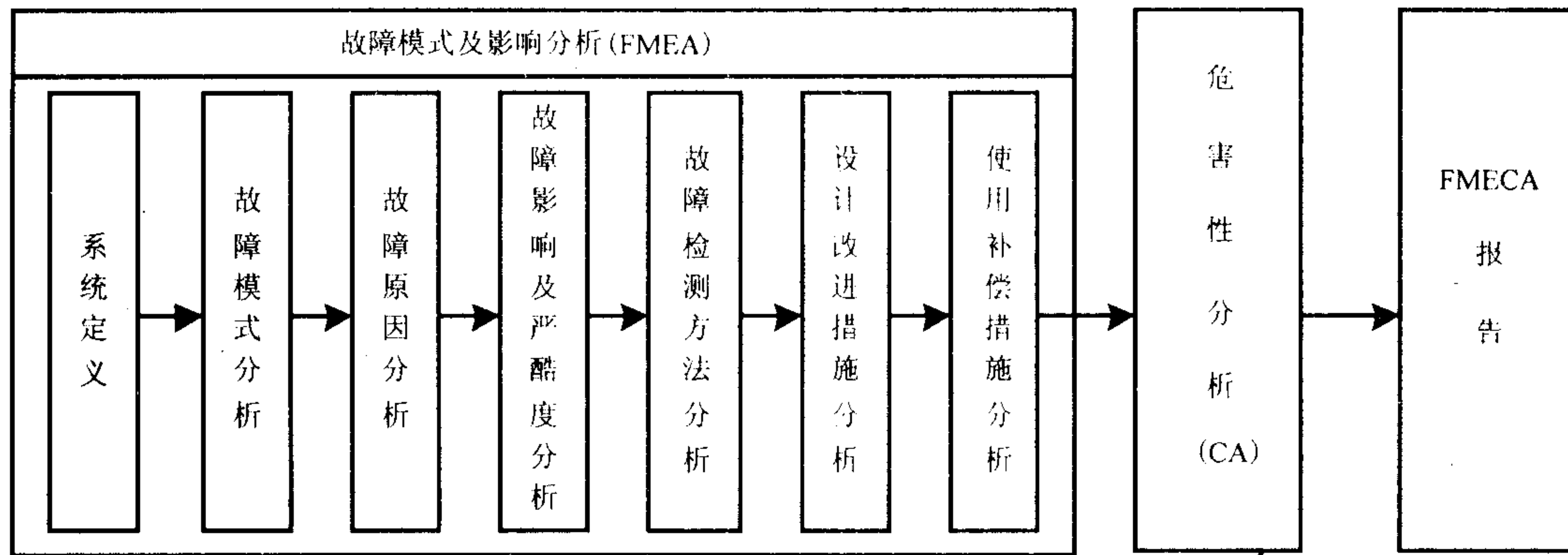


图4 功能及硬件 FMECA 的步骤

5.4 功能及硬件 FMEA 的步骤与实施

5.4.1 FMEA 的步骤

5.4.1.1 系统定义

5.4.1.1.1 系统定义目的和主要内容

系统定义的目的是使分析人员有针对性地对被分析产品在给定任务功能下进行所有可能的故障模式、原因和影响分析。系统定义可概括为产品功能分析和绘制框图(功能框图、任务可靠性框图)两个部分。

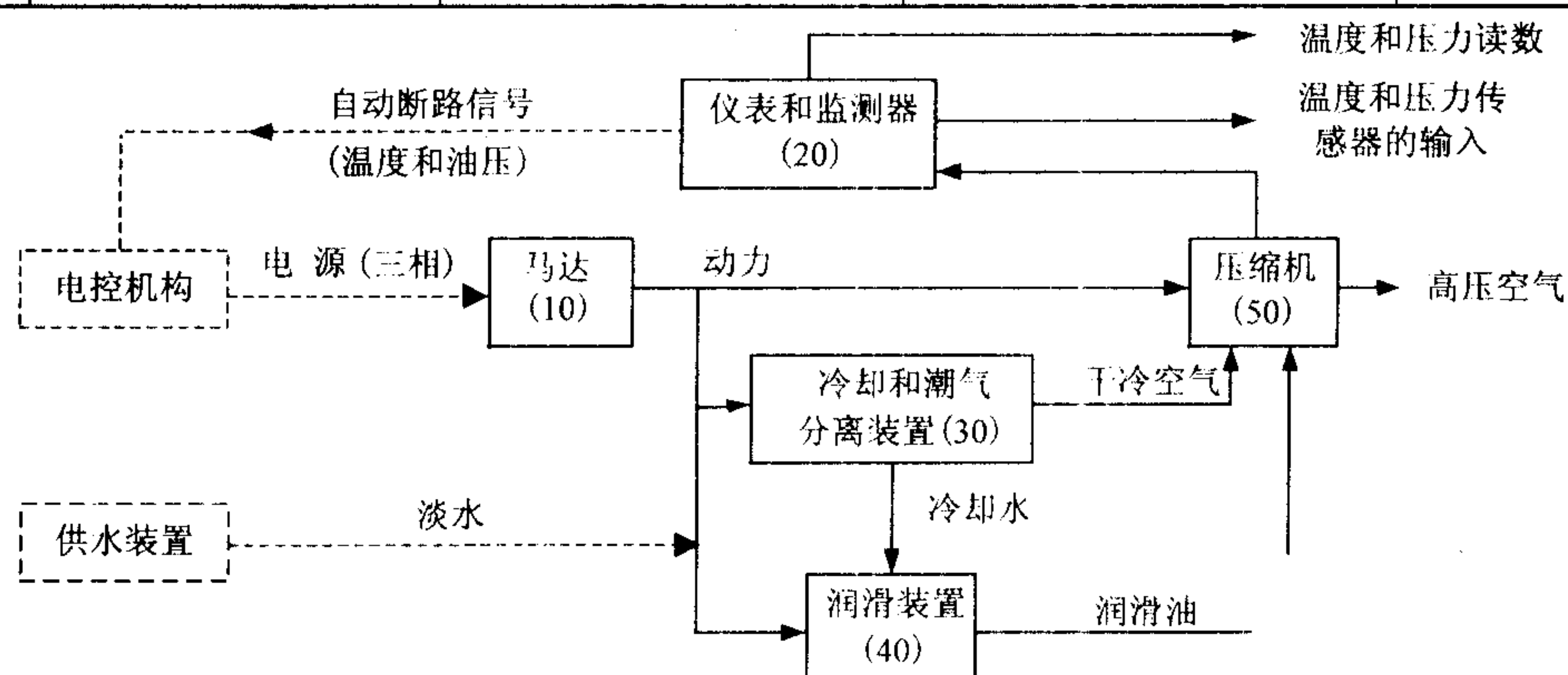
a) 产品功能分析：在描述产品任务后，对产品在不同任务剖面下的主要功能、工作方式(如连续工作、间歇工作或不工作等)和工作时间等进行分析，并应充分考虑产品接口部分的分析；

b) 绘制功能框图及任务可靠性框图；

1) 绘制功能框图——描述产品的功能可以采用功能框图方法。它不同于产品的原理图、结构图、信号流图，而是表示产品各组成部分所承担的任务或功能间的相互关系，以及产品每个约定层次间的功能逻辑顺序、数据(信息)流、接口的一种功能模型。例如表 7 和图 5 分别表示高压空气压缩机的组成和功能框图；功能框图也可表示为产品功能层次与结构层次对应关系图(见附录 B)；

表 7 高压空气压缩机的组成及其功能

序号	编码	名称	功能	输入	输出
1	10	马达	产生力矩	电源(三相)	输出力矩
2	20	仪表和监测器	控制温度和压力及显示	压力	温度和压力读数； 温度和压力传感器的输入
3	30	冷却和潮气分离装置	提供干冷却气	淡水、动力	向 50 提供干冷空气； 向 40 提供冷却水
4	40	润滑装置	提供润滑剂	淡水、动力、冷却水	向 50 提供润滑油
5	50	压缩机	提供高压空气	干冷空气、动力、润滑油	高压空气



注：图中虚线部分表示接口设备。

图5 高压空气压缩机功能框图

2) 绘制任务可靠性框图——可靠性框图是描述产品整体可靠性与其组成部分的可靠性之间的关系，其示例见图 6。它不反映产品间的功能关系，而是表示故障影响的逻辑关系。如果产品具有多项任务或多个工作模式，则应分别建立相应的任务可靠性框图。

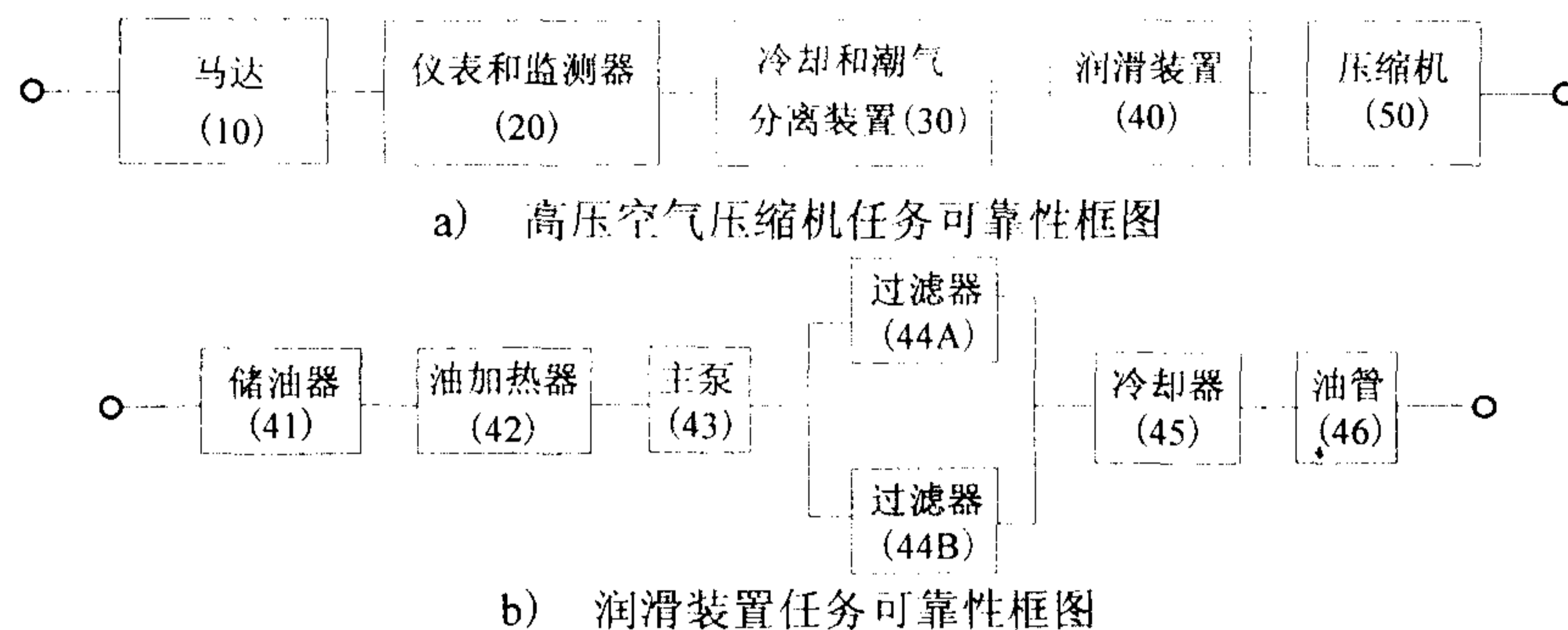


图 6 高压空气压缩机组成部分的任务可靠性框图

5.4.1.1.2 系统定义注意事项

系统定义的注意事项：完整的系统定义包括产品的每项任务，每一任务阶段以及各种工作方式的功能描述；功能是指产品的主要功能；应对产品的任务时间要求进行定量说明；明确功能及任务可靠性框图的含义、作用和绘制方法。

5.4.1.2 故障模式分析

5.4.1.2.1 故障模式分析目的和主要内容

故障模式分析的目的是找出产品所有可能出现的故障模式，其主要内容有：

- a) 不同 FMEA 方法的故障模式分析：当选用功能 FMEA 时，根据系统定义中的功能描述、故障判据的要求，确定其所有可能的功能故障模式，进而对每个功能故障模式进行分析；当选用硬件 FMEA 时，根据被分析产品的硬件特征，确定其所有可能的硬件故障模式(如电阻器的开路、短路和参数漂移等)，进而对每个硬件故障模式进行分析；
- b) 故障模式的获取方法：在进行 FMEA 时，一般可以通过统计、试验、分析、预测等方法获取产品的故障模式。对采用现有的产品，可从该产品在过去的使用过程中所发生的故障模式为基础，再根据该产品使用环境条件的异同进行分析修正，进而得到该产品的故障模式；对采用新的产品，可根据该产品的功能原理和结构特点进行分析、预测，进而得到该产品的故障模式，或与该产品具有相似功能和相似结构的产品所发生的故障模式作为基础，分析判断该产品的故障模式；对引进国外货架产品，应向外商索取其故障模式，或从相似功能和相似结构产品中发生的故障模式作基础，分析判断其故障模式；
- c) 常用元器件、零组件的故障模式：对常用的元器件、零组件可从国内外某些标准、手册中确定其故障模式；
- d) 典型的故障模式：当 b)、c) 中的方法不能获得故障模式时，可参照表 8、表 9 所列典型故障模式确定被分析产品可能的故障模式。表 8 内容较粗，适合于产品设计初期的故障模式分析；表 9 内容较详细，适用于产品详细设计的故障模式分析。

表 8 典型的故障模式(简略的)

序号	故障模式
1	提前工作
2	在规定的工作时间内不工作
3	在规定的非工作时间内工作
4	间歇工作或工作不稳定
5	工作中输出消失或故障(如性能下降等)

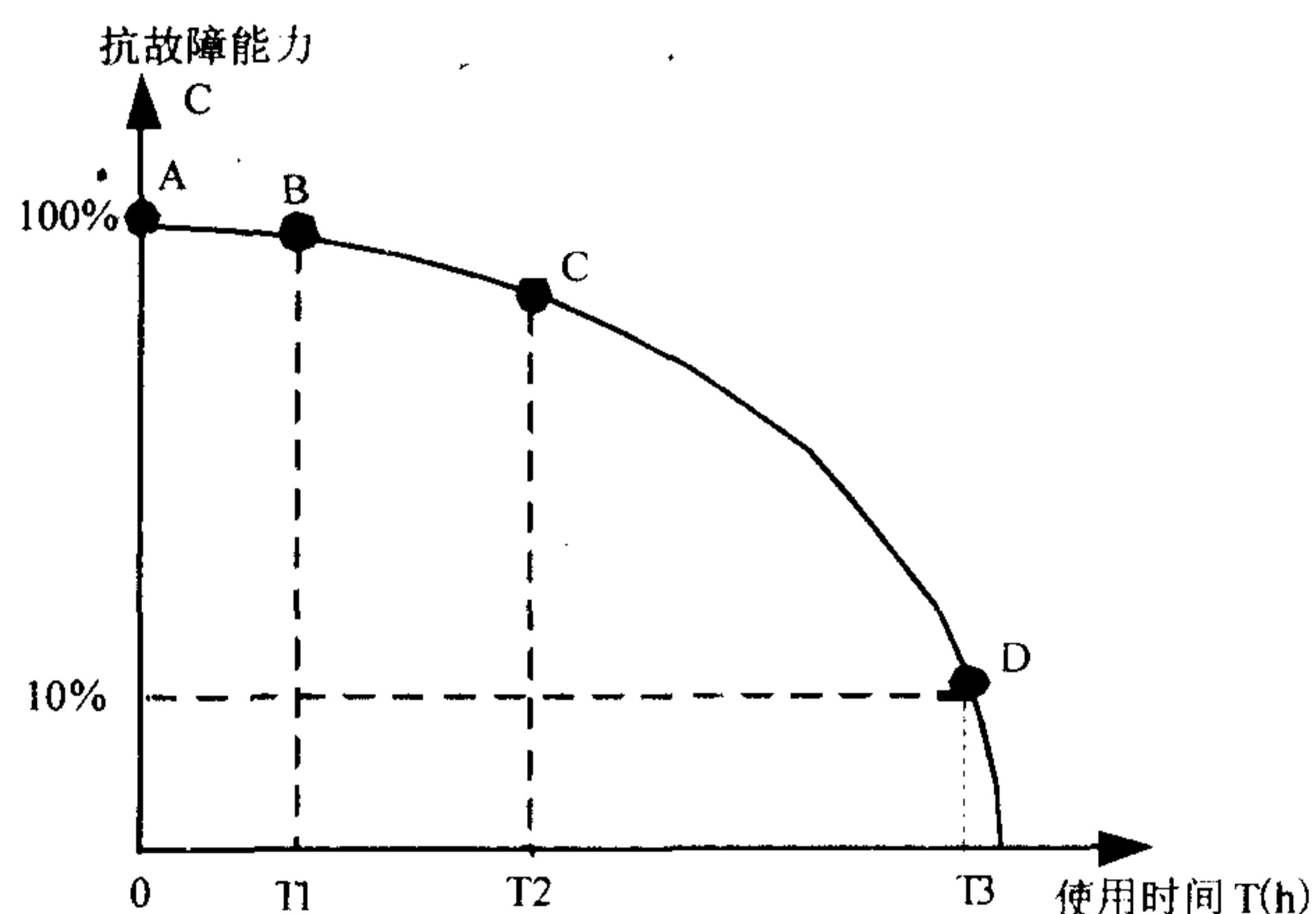
表9 典型的故障模式(较详细的)

序号	故障模式	序号	故障模式	序号	故障模式	序号	故障模式
1	结构故障(破损)	12	超出允差(下限)	23	滞后运行	34	折断
2	捆结或卡死	13	意外运行	24	输入过大	35	动作不到位
3	共振	14	间歇性工作	25	输入过小	36	动作过位
4	不能保持正常位置	15	漂移性工作	26	输出过大	37	不匹配
5	打不开	16	错误指示	27	输出过小	38	晃动
6	关不上	17	流动不畅	28	无输入	39	松动
7	误开	18	错误动作	29	无输出	40	脱落
8	误关	19	不能关机	30	(电的)短路	41	弯曲变形
9	内部漏泄	20	不能开机	31	(电的)开路	42	扭转变形
10	外部漏泄	21	不能切换	32	(电的)参数漂移	43	拉伸变形
11	超出允差(上限)	22	提前运行	33	裂纹	44	压缩变形

5.4.1.2.2 故障模式分析注意事项

故障模式分析的注意事项:

- 应区分功能故障和潜在故障。功能故障是指产品或产品的一部分不能完成预定功能的事件或状态；潜在故障是指产品或产品的一部分将不能完成预定功能的事件或状态，它是指示功能故障将要发生的一种可鉴别(人工观察或仪器检测)的状态。例如，轮胎磨损到一定程度(可鉴别的状态，属潜在故障)将发生爆胎故障(属功能故障)。图7中给出了某金属材料件的功能故障与潜在故障的示例；
- 产品具有多种功能时，应找出该产品每个功能的全部可能的故障模式；
- 复杂产品一般具有多种任务功能，则应找出该产品在每一个任务剖面下每一个任务阶段可能的故障模式。



注：A点表示无故障；B点表示初始裂纹，不可见；

C点表示潜在故障，裂纹可见；D点表示功能故障，断裂。

图7 功能故障与潜在故障的关系

5.4.1.3 故障原因分析

5.4.1.3.1 故障原因分析目的和方法

故障原因分析的目的：找出每个故障模式产生的原因，进而采取针对性的有效改进措施，防止或减少故障模式发生的可能性。

故障原因分析的方法：一是从导致产品发生功能故障模式或潜在故障模式的那些物理、化学或生物变化过程等方面找故障模式发生的直接原因；二是从外部因素(如其他产品的故障、使用、环境和人为因素等)方面找产品发生故障模式的间接原因。

5.4.1.3.2 故障原因分析的注意事项

故障原因分析的注意事项：

- 正确区分故障模式与故障原因。故障模式一般是可观察到的故障表现形式，而故障模式直接原因或间接原因是由于设计缺陷、制造缺陷或外部因素所致；
- 应考虑产品相邻约定层次的关系。因为下一约定层次的故障模式往往是上一约定层次的故障原因；
- 当某个故障模式存在两个以上故障原因时，在 FMEA 表“故障原因”栏中均应逐一注明。

5.4.1.4 故障影响及严酷度分析

5.4.1.4.1 故障影响及严酷度分析目的和主要内容

故障影响分析的目的在于：找出产品的每个可能的故障模式所产生的影响，并对其严重程度进行分析。每个故障模式的影响一般分为二级：局部影响、高一层次影响和最终影响，其定义见表 10。

表 10 按约定层次划分故障影响的分级表

名称	定义
局部影响	某产品的故障模式对该产品自身及所在约定层次产品的使用、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紧邻上一层次产品的使用、功能或状态的影响
最终影响	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

故障影响的严酷度类别应按每个故障模式的最终影响的严重程度进行确定。武器装备的严酷度类别划分见表 2。

5.4.1.4.2 故障影响分析的注意事项

故障影响分析的注意事项：

- 切实掌握三级故障影响的定义，见表 10；
- 明确不同层次的故障模式和故障影响存在着一定关系，即低层次产品故障模式对紧邻上一层次产品影响就是紧邻上一层次产品的故障模式、低层次故障模式是紧邻上一层次的故障原因，由此推论可得出不同约定层次产品之间的迭代关系，见图 9；
- 对于采用了余度设计、备用工作方式设计或故障检测与保护设计的产品，在 FMEA 中应暂不考虑这些设计措施而直接分析产品故障模式的最终影响。并根据这一最终影响确定其严酷度等级。对此情况，应在 FMEA 表中指明产品针对这种故障模式影响已采取了上述设计措施。若需更仔细分析其影响，则应借助于故障模式危害性分析。

5.4.1.5 故障检测方法分析

5.4.1.5.1 故障检测方法分析目的和主要内容

故障检测方法分析的目的在于：为产品的维修性与测试性设计、以及维修工作分析等提供依据。

故障检测方法的主要内容：一般包括：目视检查、原位检测、离位检测等，其手段例如机内测试(BIT)、自动传感装置、传感仪器、音响报警装置、显示报警装置和遥测等。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，应尽可能在设计中采用事前检测方法。

5.4.1.5.2 故障检测方法分析的注意事项

故障检测方法分析的注意事项：

- 如确无故障模式检测手段时，在 FMEA 表中的相应栏内填写“无”，并在设计中予以关注。当 FMEA 结果表明不可检测的故障模式会引起高严酷度(由不可检测故障本身或与其他故障模式组合影响而造成)时，还应将这些不可检测的故障模式列出清单；

- b) 根据需要, 增加必要的检测点, 以便区分是哪个故障模式引起产品发生故障;
- c) 从可靠性或安全性出发, 应及时对冗余系统每个组成部分进行故障检测、及时维修, 以保持或恢复冗余系统的固有可靠性。

5.4.1.6 设计改进与使用补偿措施分析

5.4.1.6.1 设计改进及使用补偿措施分析目的和主要内容

设计改进与使用补偿措施分析目的是: 针对每个故障模式的影响在设计与使用方面采取了哪些措施, 以消除或减轻故障影响, 进而提高产品的可靠性。

设计改进与使用补偿措施的主要内容:

- a) 设计改进措施: 当产品发生故障时, 应考虑是否具备能够继续工作的冗余设备; 安全或保险装置(例如监控及报警装置); 替换的工作方式(例如备用或辅助设备); 可以消除或减轻故障影响的设计改进(例如优选元器件、热设计、降额设计)等;
- b) 使用补偿措施: 为了尽量避免或预防故障的发生, 在使用和维护规程中规定的使用维护措施。一旦出现某故障后, 操作人员应采取的最恰当的补救措施等。

5.4.1.6.2 设计改进及使用补偿措施分析的注意事项

设计改进与使用补偿措施分析的注意事项: 分析人员要认真进行设计改进与使用补偿措施方面的分析, 应尽量避免在填写 FMEA 表中“设计改进措施”、“使用补偿措施”栏时均填“无”。

5.4.2 功能及硬件 FMEA 的实施

功能及硬件 FMEA 的实施, 一般是通过填写 FMEA 表格进行, 常用的 FMEA 表如表 11 所示。表 11 中的“初始约定层次”填写“初始约定层次”的产品名称; “约定层次”填写正在被分析的产品紧邻的上一层次产品, 当“约定层次”的级数较多(一般大于 3 级)时, 应从下至上按“约定层次”的级别不断分析, 直至“约定层次”为“初始约定层次”相邻的下级时, 才构成一套完整的 FMEA 表; “任务”填写“初始约定层次”所需完成的任务。若“初始约定层次”具有不同的任务, 则应分开填写 FMEA 表; 表 11 中各栏目的填写说明见表中相应栏目的描述。

表 11 功能及硬件故障模式及影响分析(FMEA)表

初始约定层次		任 务		审 核		第 页 · 共 页							
约定层次		分析人员		批准		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	设计改进措施	使用补偿措施	备注
						局部影响	高一层次影响	最终影响					
对每个产品采用一种编码体系进行标识	记录被分析产品的名称与标志	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, 依次填写每个产品的所有故障模式	根据故障原因分析的结果, 依次填写每个故障模式的所有故障原因	根据任务剖面依次填写发生故障时, 依任务阶段与该阶段内产品的工作方式	根据故障影响分析的结果, 依次填写每一个故障模式的局部、高一层次和最终影响并分别填入对应栏	根据最终影响分析的结果, 按每个故障模式确定其严酷度类别	根据产品故障模式原因、影响等分析结果, 依次填写故障检测方法	根据故障影响、故障检测等分析结果依次填写设计改进与使用补偿措施	简要记录对其其他栏的注释和补充说明			

5.5 功能及硬件危害性分析

5.5.1 危害性分析的目的

危害性分析(CA)的目的是: 对产品每一个故障模式的严重程度及其发生的概率所产生的综合影响进行分类, 以全面评价产品中所有可能出现的故障模式的影响。

5.5.2 危害性分析常用的方法

5.5.2.1 风险优先数(RPN)方法

风险优先数方法是对产品每个故障模式的 RPN 值进行优先排序, 并采取相应的措施, 使 RPN 值达

到可接受的最低水平。

产品某个故障模式的 RPN 等于该故障模式的严酷度等级 (ESR) 和故障模式的发生概率等级 (OPR) 的乘积, 见公式(1)。

$$RPN = ESR \times OPR \dots\dots\dots (1)$$

式中: RPN 数越高, 则其危害性越大, 其中 ESR 和 OPR 的评分准则如下:

- a) 故障模式影响的严酷度等级 (ESR) 评分准则: ESR 是评定某个故障模式的最终影响的程度。表 12 给出了 ESR 的评分准则。在分析中, 该评分准则应综合所分析产品的实际情况尽可能的详细规定。

表 12 影响的严酷度等级 (ESR) 的评分准则

ESR 评分等级	严酷度等级	故障影响的严重程度
1, 2, 3	轻度的	不足以导致人员伤害、产品轻度的损坏、轻度的财产损失及轻度环境损坏, 但它会导致非计划性维护或修理
4, 5, 6	中等的	导致人员中等程度伤害、产品中等程度损坏、任务延误或降级、中等程度财产损失及中等程度环境损害
7, 8	致命的	导致人员严重伤害、产品严重损坏、任务失败、严重财产损失及严重环境损害
9, 10	灾难的	导致人员死亡、产品(如飞机、坦克、导弹及船舶等)毁坏, 重大财产损失和重大环境损害

- b) 故障模式发生概率等级 (OPR) 评分准则: OPR 是评定某个故障模式实际发生的可能性。表 13 给出了 OPR 的评分准则, 表中“故障模式发生概率 P_m 参考范围”是对应各评分等级给出的预计该故障模式在产品的寿命周期内发生的概率, 该值在具体应用中可以视情定义。

表 13 故障模式发生概率等级 (OPR) 的评分准则

OPR 评分等级	故障模式发生的可能性	故障模式发生概率 P_m 参考范围
1	极低	$P_m \leq 10^{-6}$
2, 3	较低	$1 \times 10^{-6} < P_m \leq 1 \times 10^{-4}$
4, 5, 6	中等	$1 \times 10^{-4} < P_m \leq 1 \times 10^{-2}$
7, 8	高	$1 \times 10^{-2} < P_m \leq 1 \times 10^{-1}$
9, 10	非常高	$P_m > 10^{-1}$

5.5.2.2 危害性矩阵分析方法

5.5.2.2.1 危害性矩阵分析目的和分类

危害性矩阵分析的目的是: 比较每个产品及其故障模式的危害性程度, 为确定产品改进措施的先后顺序提供依据。它分为定性的危害性矩阵分析方法、定量的危害性矩阵分析方法。当不能获得产品故障数据时, 应选择定性的危害性矩阵分析方法; 当可以获得较为准确的产品故障数据时, 则选择定量的危害性矩阵分析方法。

5.5.2.2.2 定性危害性矩阵分析方法

定性危害性矩阵分析方法是将每个故障模式发生的可能性分成离散的级别, 按所定义的等级对每个故障模式进行评定。根据每个故障模式出现概率大小分为 A、B、C、D、E 五个不同的等级, 其定义见表 14, 结合工程实际, 其等级及概率可以进行修正。故障模式概率等级的评定之后, 应用危害性矩阵图对每个故障模式进行危害性分析。

表 14 故障模式发生概率的等级划分

等级	定义	故障模式发生概率的特征	故障模式发生概率(在产品使用时间内)
A	经常发生	高概率	某个故障模式发生概率大于产品总故障概率的 20%
B	有时发生	中等概率	某个故障模式发生概率大于产品总故障概率的 10%，小于 20%
C	偶然发生	不常发生	某个故障模式发生概率大于产品总故障概率的 1%，小于 10%
D	很少发生	不大可能发生	某个故障模式发生概率大于产品总故障概率的 0.1%，小于 1%
E	极少发生	近乎为零	某个故障模式发生概率小于产品总故障概率的 0.1%

5.5.2.2.3 定量危害性矩阵分析方法

定量危害性矩阵分析方法主要是按公式(2)、公式(4)分别计算每个故障模式危害度 C_{mj} 和产品危害度 C_r ，并对求得的不同的 C_{mj} 和 C_r 值分别进行排序，或应用危害性矩阵图对每个故障模式的 C_{mj} 、产品的 C_r 进行危害性分析。

a) 故障模式的危害度 C_{mj}

C_{mj} 是产品危害度的一部分。产品在工作时间 t 内，以第 j 个故障模式发生的某严酷度等级下的危害度 C_{mj} ，见公式(2)

$$C_{mj} = \alpha_j \cdot \beta_j \cdot \lambda_p \cdot t \dots \dots \dots (2)$$

式中：

$j=1, 2, \dots, N$, N 为产品的故障模式总数。

α_j (故障模式频数比)——产品第 j 种故障模式发生次数与产品所有可能的故障模式数的比率。

α_j 一般可通过统计、试验、预测等方法获得。当产品的故障模式数为 N ，则 α_j ($j=1, 2, \dots, N$) 之和为 1，见公式(3)

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1 \dots \dots \dots (3)$$

β_j (故障模式影响概率)——产品在第 j 种故障模式发生的条件下，其最终影响导致“初始约定层次”出现某严酷度等级的条件概率。 β 值的确定是代表分析人员对产品故障模式、原因和影响等掌握的程度。通常 β 值的确定是按经验进行定量估计。表 15 所列的三种 β 值可供选择；

λ_p ——被分析产品在其任务阶段内的故障率，单位为 1/小时(1/h)；

t ——产品任务阶段的工作时间，单位为小时(h)。

表 15 故障影响概率 β 的推荐值

序号	1		2		3	
方法来源	本标准推荐采用		国内某歼击飞机设计采用		GB 7826	
β 规定值	实际丧失	1	一定丧失	1	肯定损伤	1
	很可能丧失	0.1~1	很可能丧失	0.5~0.99	可能损伤	0.5
	有可能丧失	0~0.1	可能丧失	0.1~0.49	很少可能	0.1
	无影响	0	可忽略	0.01~0.09	无影响	0
			无影响	0		

b) 产品危害度 C_r

产品的危害度 C_r 是该产品在给定的严酷度类别和任务阶段下的各种故障模式危害度 C_{mj} 之和，见公式(4)。

$$C_r = \sum_{j=1}^N C_{mj} = \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \beta_j \cdot \lambda_p \cdot t \dots\dots\dots (4)$$

式中, $j=1, 2, \dots, N$, N 为产品的故障模式总数。

5.5.2.2.4 绘制危害性矩阵图及应用

绘制危害性矩阵图的目的、方法和应用:

- a) 绘制危害性矩阵图的目的: 比较每个故障模式影响的危害程度, 为确定改进措施的先后顺序提供依据。危害性矩阵是在某个特定严酷度级别下, 对每个故障模式危害程度或产品危害度的结果进行比较。危害性矩阵与风险优先数(RPN)一样具有风险优先顺序的作用。
- b) 绘制危害性矩阵图的方法: 横坐标一般按等距离表示严酷度等级; 纵坐标为产品危害度 C_r 或故障模式危害度 C_{mj} 或故障模式发生概率等级, 详见图 8。其做法是: 首先按 C_r 或 C_{mj} 的值或故障模式发生概率等级在纵坐标上查到对应的点, 再在横坐标上选取代表其严酷度类别的直线, 并在直线上标注产品或故障模式的位置(利用产品或故障模式代码标注), 从而构成产品或故障模式的危害性矩阵图, 即在图 8 上得到各产品或故障模式危害性的分布情况。
- c) 危害性矩阵图的应用: 从图 8 中所标记的故障模式分布点向对角线(图中虚线 OP)作垂线, 以该垂线与对角线的交点到原点的距离作为度量故障模式(或产品)危害性的依据, 距离越长, 其危害性越大, 越应尽快采取改进措施。在图 8 中, 因 01 距离比 02 距离长, 则故障模式 M_1 比故障模式 M_2 的危害性大。

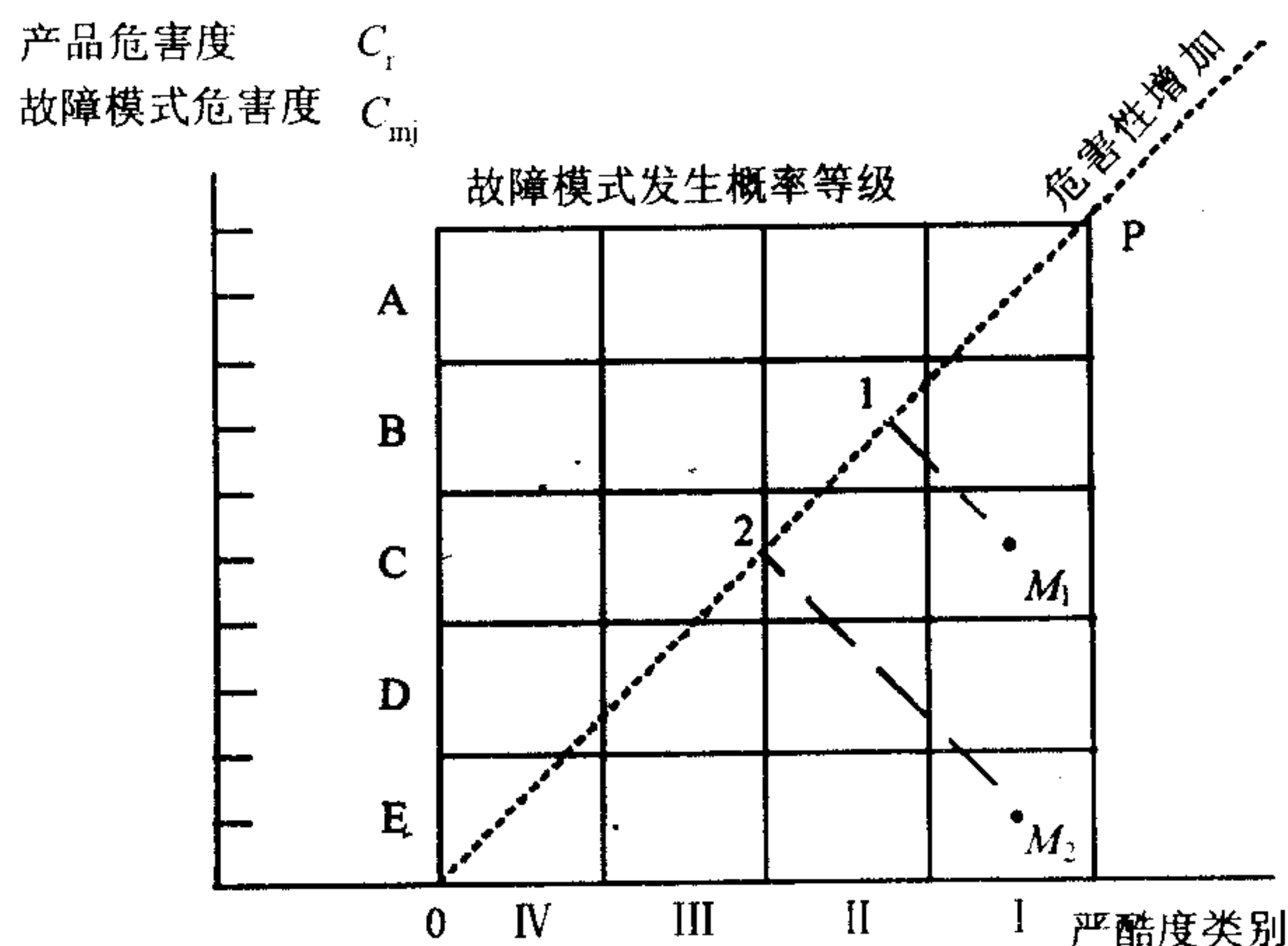


图 8 危害性矩阵图

5.5.3 危害性分析的实施

CA 的实施与 FMEA 的实施一样, 均采用填写表格的方式进行。常用的危害性分析表见表 16。

表 16 危害性分析(CA)表

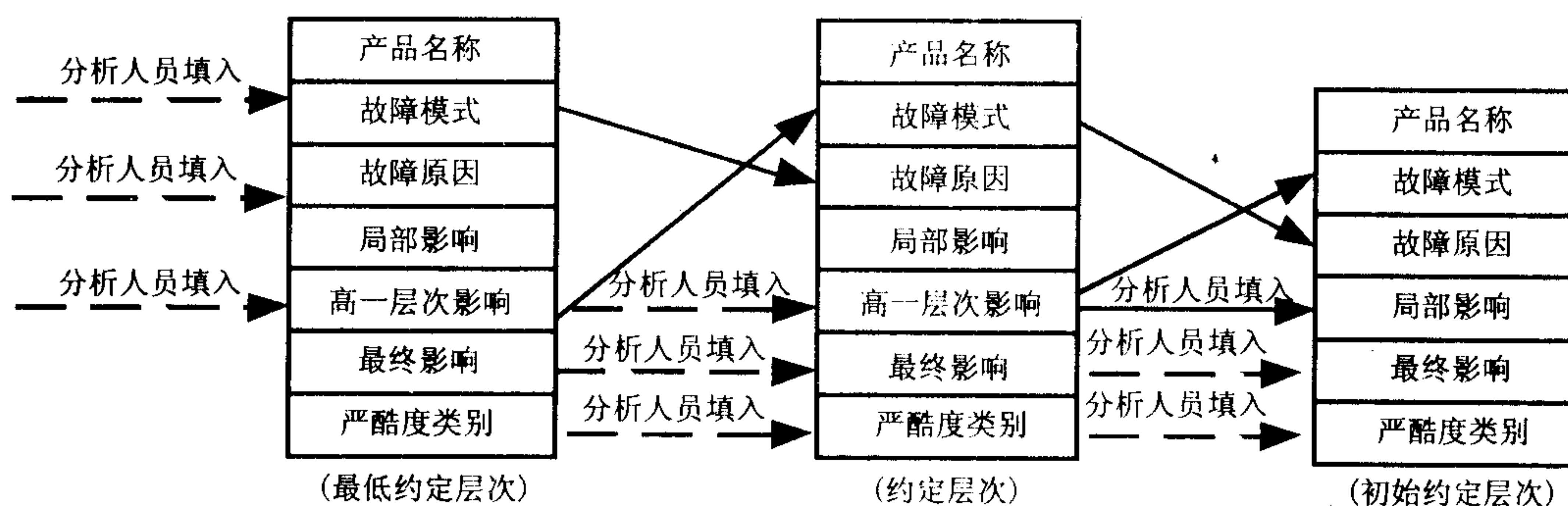
初始约定层次产品		任务		审核		第 页·共 页								
约定层次产品		分析人员		批准		填表日期								
代码	产品或功能标志	功能	故障模式	故障原因	任务阶段与工作方式	严酷度类别	故障模式概率等级或故障数据源	故障率 λ_p (1/h)	故障模式频数比 α_j	故障影响概率 β_j	工作时间 t (h)	故障模式危害度 C_{mj}	产品危害度 C_r	备注
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)

在表 16 中, 第(1)~(7)栏的内容与 FMEA 表(表 11)中的内容相同, 第(8)栏记录被分析产品的“故障模式概率等级或故障数据源”的来源, 当采用定性分析方法时此栏只记录故障模式概率等级, 并取消(9)~(14)栏。第(9)~(14)栏分别记录危害度计算的相关数据及计算结果。第(15)栏记录对其他栏的注释和补充。

5.6 功能及硬件 FMECA 的注意事项

功能及硬件 FMECA 的注意事项：

- 重视 FMECA 计划工作。实施中应贯彻边设计、边分析、边改进和“谁设计、谁分析”的原则。
- 明确约定层次间的关系。各约定层次间存在着一定的关系，即低层次产品的故障模式是紧邻上一层次的故障原因；低层次产品故障模式对高一层次的影响是紧邻上一层次产品的故障模式。FMECA 是一个由下而上的分析迭代过程，见图 9。



注：假设此系统只有三个层次（即最低约定层次、约定层次和初始约定层次），每一层次只有一个产品，每一产品只有一个故障模式，每一故障模式只有一个故障原因、影响。

图 9 不同约定层次产品间故障模式、原因和影响的关系

- 加强规范化工作。实施 FMECA，型号总体单位应加强规范化管理。型号总体单位应明确与各转承制单位之间的职责与接口分工，统一规范、技术指导，并跟踪其效果，以保证 FMECA 分析结果的正确性、可比性。
- 深刻理解、切实掌握分析中的基本概念。诸如：严酷度是某一故障模式对“初始约定层次产品”的最终影响的严重程度；严酷度与危害度是两个不同概念；故障检测方法是产品运行或使用维修检查故障的方法，而不是指研制试验和可靠性试验过程中的检查故障方法等等。
- 对于风险优先数 (RPN) 高的故障模式，应从降低故障发生概率等级 (OPR) 和故障影响严酷度等级 (ESR) 两方面提出改进措施；在 RPN 分析中，可能出现不同的 OPR、ESR，但其积 RPN 相同，对此分析人员应对严酷度等级高的故障模式给予更大的关注。
- 危害性分析时，若只能估计每一个故障模式发生的概率等级，则可在 FMEA 表 (表 11) 中增加“故障模式发生概率等级”一栏，即将 FMEA 表变为定性的 CA 表，并可通过绘制危害性矩阵进行定性的危害性分析。
- 积累经验、注重信息。建立相应的故障模式及相关信息库。
- 功能及硬件 FMECA 是一种静态、单因素的分析方法，对动态多因素分析方面还很不完善，为了对产品进行全面分析，进行功能及硬件 FMECA 时还应与其他故障分析方法相结合。

6 软件 FMECA (SFMECA)

6.1 概述

软件 FMECA 主要是在软件开发阶段的早期，通过识别软件故障模式，研究分析各种故障模式产生的原因及其造成的后果，寻找消除和减少其有害后果的方法，以尽早发现潜在的问题，并采取相应的措施，从而提高软件的可靠性和安全性。

软件根据其特性可分为嵌入式软件和非嵌入式软件。嵌入式软件是指嵌入式计算机系统用的软件。嵌入式计算机系统是指归结在一个其主要目的不是进行计算的较大系统中成为其完整不可分开部分的计算机系统。该系统的硬件和软件均按规定功能要求进行配置，在可靠性与安全性等方面相互联系与制约，并同步进行设计，具有智能化的实时控制的特征，且有重量轻、使用与安装方便等特点，在装备上得到广泛应用。本标准仅涉及嵌入式软件 FMECA (SFMECA) 的分析方法和步骤。

6.2 嵌入式软件 FMECA 的目的与工作时机

SFMECA 的目的是找出嵌入式软件所有可能存在的危害软/硬件综合系统可靠安全运行的故障模式，分析其产生的软件或硬件的故障原因、影响及后果，并在设计上采取相应的改进措施，以保证嵌入式软/硬件综合系统可靠安全地运行。

SFMECA 主要用于嵌入式软件开发阶段的早期，即需求分析阶段、概要设计阶段，也可用于嵌入式软件开发的其他阶段，以及产品定型后嵌入式软件的可靠性、安全性等分析。

6.3 嵌入式软件 FMECA 的步骤与实施

SFMECA 的步骤与“功能及硬件 FMECA”的步骤相似，见图 10。只有先进行嵌入式软件故障模式及影响分析(SFMEA)，才能进行嵌入式软件危害性分析(SCA)。

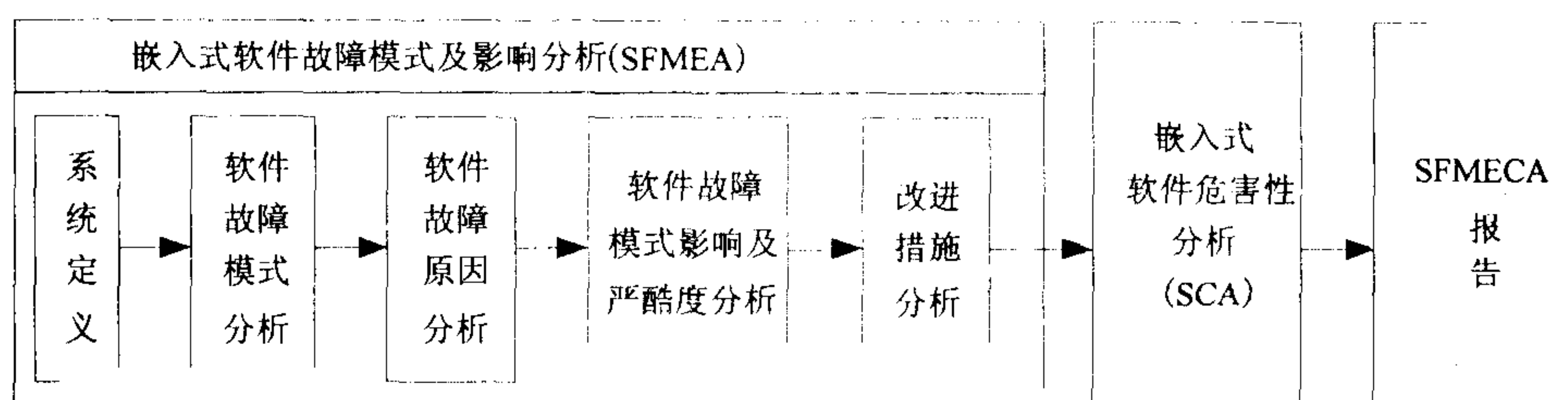


图 10 SFMECA 的步骤

6.3.1 嵌入式软件 FMEA 的步骤

6.3.1.1 系统定义

- a) 绘制软件功能流程图。在软件需求分析阶段应形成软件需求说明文档，在文档中应给出软件功能流程图。流程图中给出软/硬件综合系统中每个软件部件或软件单元之间的功能逻辑关系，它表示了软/硬件综合系统自上而下的层次关系；
- b) 定义软件约定层次结构。软件由程序、分程序、模块和程序单元组成。图 11 给出了软件约定层次示例。其“初始约定层次”定为装备级，“最低约定层次”可定为软件单元，“约定层次”可定为软件部件直至软件/硬件综合系统。该系统由计算机软件配置项(CSCI)、硬件技术状态项目(HWCI)及软/硬件接口要求规格说明(IRS)组成。在软件产品中，应注意某些软件单元是重复使用的、非开发的(如外购或共享)，对此情况应在图 11 中加以标注。软件约定层次定义的深度，同样影响着 SFMECA 的工作量和难度。在定义软件约定层次时应根据实际需要，重点考虑关键的、重要功能的软件部件或模块。

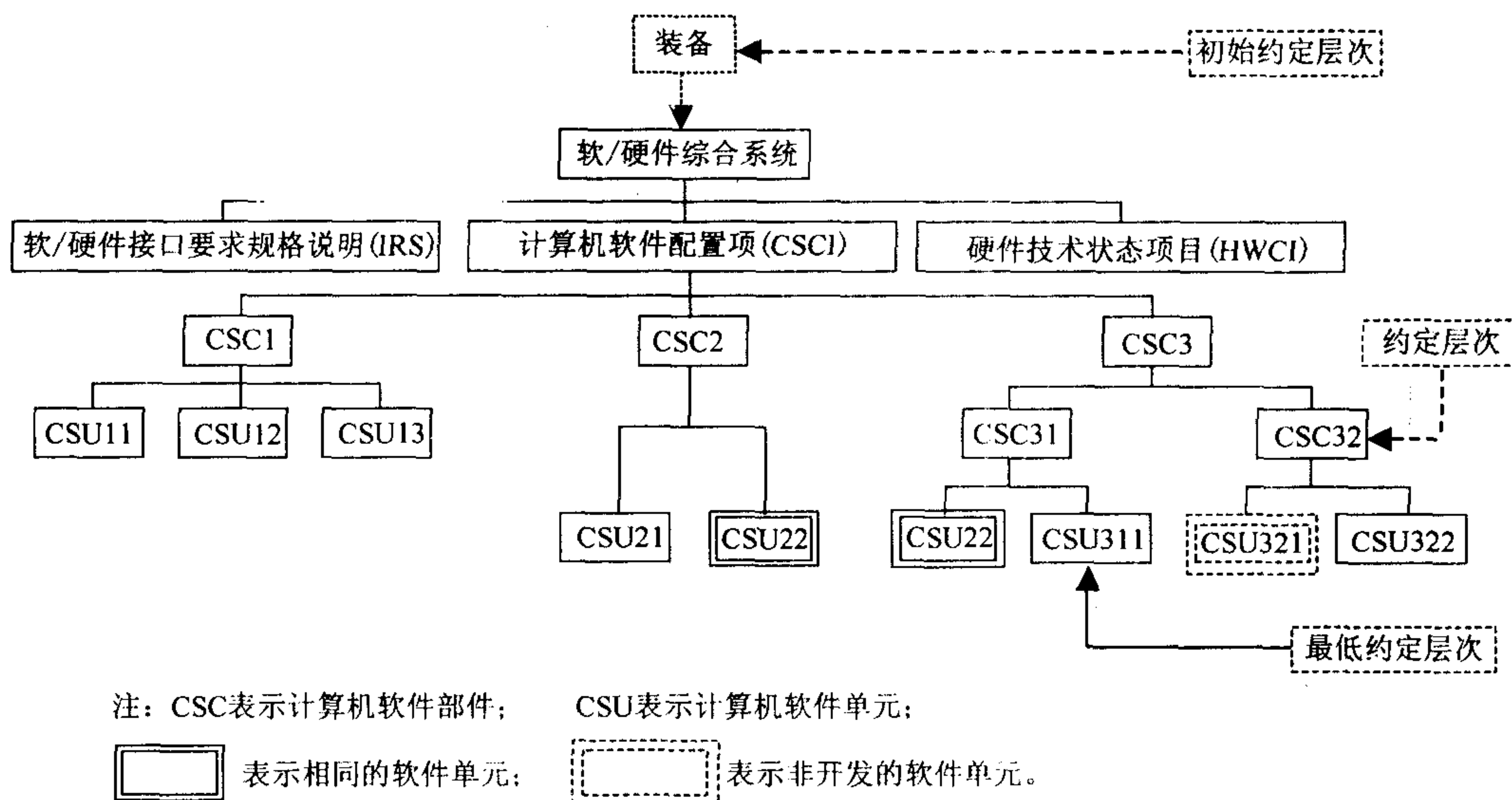


图 11 软件约定层次划分示例

6.3.1.2 软件故障模式分析

软件故障模式是软件故障的表现形式。软件故障模式分析的目的是针对每个被分析的软件单元，找出其所有可能的故障模式，见表 17。

表 17 软件故障模式分类及其典型示例(不局限于)

序号	类别	软件故障模式示例			
1	软件的通用故障模式	1) 运行时不符合要求			
		2) 输入不符合要求			
		3) 输出不符合要求			
2	软件的详细故障模式	输入故障	1) 未收到输入	输出故障	1) 输出结果错误(如输出项缺损或多余等)
			2) 收到错误输入		2) 输出数据精度轻微超差
			3) 收到数据轻微超差		3) 输出数据精度中度超差
			4) 收到数据中度超差		4) 输出数据精度严重超差
			5) 收到数据严重超差		5) 输出参数不完全或遗漏
			6) 收到参数不完全或遗漏		6) 输出格式错误
			7) 其他		7) 输出打印字符不符合要求
		程序故障	1) 程序无法启动		8) 输出拼写错误/语法错误
			2) 程序运行中非正常中断		9) 其他
			3) 程序运行不能终止		
	其他	4) 程序不能退出	1) 未达到功能/性能的要求		
		5) 程序运行陷入死循环	2) 不能满足用户对运行时间的要求		
		6) 程序运行对其他单元或环境产生有害影响	3) 不能满足用户对数据处理量的要求		
		7) 程序运行轻微超时	4) 多用户系统不能满足用户数的要求		
		8) 程序运行明显超时	5) 其他		
		9) 程序运行严重超时			
		10) 其他			
	其他	1) 程序运行改变了系统配置要求	6) 人为操作错误		
		2) 程序运行改变了其他程序的数据	7) 接口故障		
		3) 操作系统错误	8) I/O 定时不准确导致数据丢失		
4) 硬件错误		9) 维护不合理/错误			
5) 整个系统错误		10) 其他			

6.3.1.3 软件故障原因分析

针对每个软件的故障模式应分析其所有可能的原因。软件的故障原因往往是软件开发过程中形成的各类缺陷所引起的。软件故障原因按其缺陷分类及典型示例见表 18。

表 18 软件故障原因按其缺陷分类及典型示例(不局限于)

序号	软件缺陷类型	详细的软件缺陷	备注
1	需求缺陷	1) 软件需求制定不合理或不正确; 2) 需求不完全; 3) 有逻辑错误; 4) 需求分析文档有误	
2	功能和性能缺陷	1) 功能和性能规定有误, 或遗漏功能, 或有冗余功能; 2) 为用户提供的信息有错或不确切; 3) 对异常情况处理有误	属最普遍、最值得重视的缺陷
3	软件结构缺陷	1) 程序控制或控制顺序有误; 2) 处理过程有误	同第 2 项

表 18(续)

序号	软件缺陷类型	详细的软件缺陷	备注
4	数据缺陷	1) 数据定义或数据结构有误; 2) 数据存取或操作有误; 3) 变量缩放比率或单位不正确; 4) 数据范围不正确; 5) 数据错误或丢失	同第 2 项
5	软件实现和编码缺陷	1) 编码或按键有误; 2) 违背编码风格要求或标准; 3) 语法错; 4) 数据名错; 5) 局部变量与全局变量混淆	
6	软/硬件接口缺陷	1) 软件内部接口、外部接口有误; 2) 软件各相关部分在时间配合或数据吞吐等方面不协调; 3) I/O 时序错误导致数据丢失	

6.3.1.4 软件故障影响及严酷度分析

主要包括:

- 软件故障影响——嵌入式软件的故障影响必须分析每个软件故障模式对软/硬件综合系统的功能影响, 考虑软件系统自身的复杂性, 其故障也可以按照功能及硬件 FMECA 方法分为局部影响、高一层次影响和最终影响, 见表 22; 但是基于嵌入式软件的特殊性, 在分析软件的故障影响时, 可直接分析其最终影响, 也可直接分析软/硬件综合系统的影响。本指南推荐采用前者软件故障影响分析方法;
- 软件故障影响的严酷度——根据每个软件故障模式影响的严重程度划分其严酷度等级。推荐采用表 20 规定的要求, 划分软件严酷度等级。

6.3.1.5 改进措施分析

根据每个软件故障模式的原因、影响及严酷度等级, 综合提出有针对性的改进措施。

6.3.2 嵌入式软件危害性分析

在工程中, 推荐采用风险优先数(RPN)方法进行软件的危害性分析(SCA)。软件风险优先数 SRPN 按公式(5)进行计算:

$$SRPN = SESR \times SOPR \times SDDR \dots \dots \dots (5)$$

式中:

SESR——软件故障模式的严酷度等级

SOPR——软件故障模式的发生概率等级

SDDR——软件故障模式的被检测难度等级

其评分准则分别见表 19~表 21。

表 19 软件故障模式的严酷度等级(SESR)的评分准则

软件故障模式影响发生的可能性	软件故障模式影响的严重程度	评分等级
极高且无警告提示	影响系统运行的安全性, 或不符合国家安全规定, 且不能发出警告	10
极高但有警告提示	影响系统运行的安全性, 或不符合国家安全规定, 但能发出警告	9
非常高	影响系统丧失主要功能而不能运行	8
高	系统仍能运行, 但运行水平降级, 用户不满意	7
中等	系统仍能运行, 但丧失使用的方便与舒适性	6
低	系统仍能运行, 但影响使用的方便与舒适性	5
较低	影响轻度	4
非常次要的	影响轻微	3
极次要的	影响极小	2
无	无影响	1

表 20 软件故障模式的发生概率等级 (SOPR) 的评分准则

软件故障模式发生的可能性	软件故障模式发生概率 P_m 参考范围(每单元)	评分等级
非常高(几乎不可避免发生故障)	$P_m \geq 5 \times 10^{-1}$	10
	$1 \times 10^{-1} \leq P_m < 5 \times 10^{-1}$	9
高(重复故障)	$1 \times 10^{-2} \leq P_m < 1 \times 10^{-1}$	8
	$1 \times 10^{-3} \leq P_m < 1 \times 10^{-2}$	7
中等(偶然故障)	$1 \times 10^{-3} \leq P_m < 2 \times 10^{-3}$	6
	$2 \times 10^{-4} \leq P_m < 1 \times 10^{-3}$	5
低(相对几乎无故障)	$1 \times 10^{-4} \leq P_m < 2 \times 10^{-4}$	4
	$2 \times 10^{-5} \leq P_m < 1 \times 10^{-4}$	3
非常低(几乎不可能故障)	$1 \times 10^{-5} \leq P_m < 2 \times 10^{-5}$	2
	$2 \times 10^{-6} \leq P_m < 1 \times 10^{-5}$	1

表 21 软件故障模式被检测的难度等级 (SDDR) 的评分准则

软件故障模式被检测的可能性	软件故障被检测的难度概率 P_D 参考范围(每单元)	评分等级
完全不能确定	$P_D < 2 \times 10^{-6}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式, 或根本无此类检测装置	10
非常微小	$P_D \approx 2 \times 10^{-6}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	9
微小	$2 \times 10^{-6} < P_D \leq 2 \times 10^{-4}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	8
非常低	$2 \times 10^{-4} < P_D \leq 2 \times 10^{-3}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	7
低	$2 \times 10^{-3} < P_D \leq 1 \times 10^{-2}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	6
中等	$1 \times 10^{-2} < P_D \leq 2 \times 10^{-2}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	5
中等偏高	$2 \times 10^{-2} < P_D \leq 5 \times 10^{-2}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	4
高	$5 \times 10^{-2} < P_D \leq 3.3 \times 10^{-1}$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	3
非常高	$3.3 \times 10^{-1} < P_D$ 可能发现故障原因/机理和故障模式	2
完全确定	$P_D \approx 1$ 完全能发现故障原因/机理和故障模式	1

6.3.3 SFMECA 的实施

SFMECA 的实施与“功能及硬件 FMECA”一样, 其主要工作是填写 SFMECA 表(表 22)。表中各栏的填写要求见表 22。

表 22 嵌入式软件 FMECA 表

初始约定层次		任务		审核		第 页 · 共 页								
约定层次		分析人员		批准		填表日期								
代码	单元	功能	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度类别	危害性分析				改进措施	备注
					局部影响	高层次影响	最终影响		软件严酷度等级 (SESR)	软件发生概率等级 (SOPR)	软件被检测难度等级 (SDDR)	软件风险优先数 (SRPN)		
	在 CSCI、CSC, 或 CSU 的软件单元名	单元与执行的主功能	与性能有关的所有故障模式	导致故障发生的可能原因	根据故障分析结果, 依次填写软件故障模式的局部、高层次和最终影响	按故障最终影响严重程度确定	分别按表 19、表 20 和表 21 取值	对应前三项的数值相乘	根据影响的严酷度等级和 SRPN 大小简要描述改进措施	主要记录对其他栏的注释和补充说明				

注: 若只进行软件 FMEA, 则取消表中“危害性分析”栏。

6.4 嵌入式软件 FMECA 的注意事项

主要包括:

- a) 明确 SFMECA 在不同研制阶段的应用重点。在软件需求分析与概要设计阶段,采用功能流程图找出这两个阶段可能存在与功能和性能有关的错误,以完善需求分析与概要设计;在软件详细设计与编码中可能存在与遗留的功能和性能有关的缺陷,并用自下而上的方法,验证软件缺陷的影响及严酷度,为软件集成与测试提供信息。
- b) 明确和掌握 SFMECA 基本步骤中主要内容:
 - 1) 分析对象既可以是软件的系统、分系统、部件,又可以是能单独编译的模块,但一般选择模块作为最小分析单元;
 - 2) 软件故障模式也是 SFMECA 的基础。软件是由若干功能模块所组成,其故障模式既包括功能故障模式,又有性能故障模式,但主要是功能故障模式,从这点看,SFMECA 与硬件 FMECA 无本质区别;
 - 3) 软件故障原因是由于软件缺陷在运行时被触发而产生的。对软件 FMECA 是找出其关键调用路径下的关键软件缺陷。软件故障与硬件故障不同,软件故障除了与硬件故障一样与功能有关的缺陷外,还有一种仅与软件本身有关的缺陷。对这两种缺陷在 SFMECA 中均要加以纠正;
 - 4) 故障影响既可对每个软件故障模式所造成的“局部影响”、“高一层次影响”和“最终影响”进行分析,也可对“局部影响”、“高一层次影响”进行分析,或直接对“局部影响”、“最终影响”进行分析;
 - 5) 严酷度等级划分可按“功能及硬件 FMECA”方法进行定义;
 - 6) 软件危害性分析主要是采用 RPN 分析方法。
- c) SFMECA 与其他故障分析方法(如软件 FTA 等)综合进行分析可取得更佳效果。
- d) 积累经验,建立信息库。SFMECA 方法在国内尚缺经验和数据,应积累开展 SFMECA 的有关信息,并建立相应信息库,为有效开展 SFMECA 提供支持。

7 损坏模式及影响分析(DMEA)

7.1 DMEA 的目的与范围

DMEA 也属 FMEA 中的一种分析方法。其目的是为武器装备的生存力和易损性的评估提供依据。DMEA 是确定战斗损伤所造成的损坏程度,以提供因威胁机理所引起的损坏模式对武器装备执行任务功能的影响,进而有针对性地提出设计、维修、操作等方面的改进措施。

DMEA 也适用于产品论证、方案、工程研制与定型、生产和使用阶段,DMEA 和 FMEA 一样,应在产品研制阶段的早期进行,以提供产品可能承受规定的敌方威胁能力有关的信息。这有利于提高武器系统的生存力,加快研制进度,减少寿命周期费用。

7.2 DMEA 的步骤

DMEA 的步骤见图 12。其主要内容:

- a) 威胁机理的分析:武器装备在战场上的损伤是复杂多样的。作为设计分析技术之一的 DMEA 不可能全面地预测到未来战场的各种威胁机理所引起的损伤。在实施 DMEA 之前,敌方攻击能力、我方作战任务、自然环境因素等,由订购方和承制方共同确定一种或几种典型的潜在威胁条件(如敌方攻击方式、攻击的火力等)。DMEA 应在这种典型的威胁条件下进行威胁机理分析;
- b) 重要部件的确定: DMEA 与 FMEA 不同,它不是对产品中的所有部件进行分析,而仅是围绕重要部件展开分析。根据 FMEA 结果(如严酷度)、作战要求、功能分析,并利用任务可靠性框图和功能冗余技术确定重要系统重要部件,并进行 DMEA。对每一个重要部件,应确定由

特定的威胁机理引起的损坏模式及其对武器装备主要功能的影响。DMEA 分析应确定重要部件可能遇到的损坏及其影响。但进行 DMEA 时, 还要考虑一般件对重要件是否会产生损坏影响;

- c) 约定层次的确定: 按 FMEA 中的约定层次进行 DMEA 约定层次的定义分析;
- d) 所有可能的损坏模式的确定, 见 7.3 节的相关内容;
- e) 所有可能的损坏模式影响的确定, 见 7.3 节的相关内容;
- f) 改进措施的建议, 见 7.3 节的相关内容;
- g) DMEA 报告, 主要包括: 概述、被分析对象的描述、威胁机理因素的分析假设、重要部件的确定、损坏模式及损坏影响分析、DMEA 表格的填写、结论及建议、附表及清单(如威胁条件清单、重要部件清单)等。

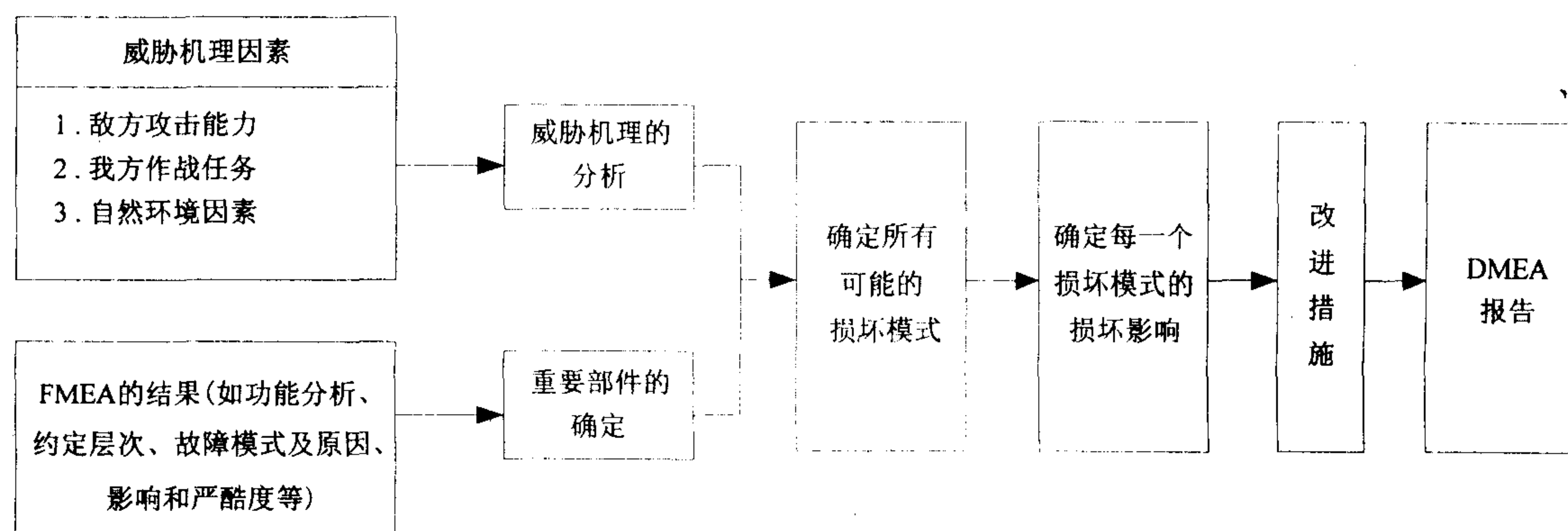


图 12 损坏模式及影响分析(DMEA)的步骤

7.3 DMEA 的实施

根据产品每个任务阶段的功能要求、约定层次等进行“损坏模式及影响分析(DMEA)表”(表 23)的填写。

表 23 损坏模式及影响分析(DMEA)表

初始约定层次			任 务	审 核	第 页 · 共 页				
约定层次			分析人员	批准	填表日期				
代码	产品或 功能标志	功能	任务阶段与 工作方式	损坏模式	损 坏 影 响			改进措施	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)

表 23 中的表头上部项目、(1)~(5)栏均取自对应产品“功能及硬件 FMEA”(表 11)的分析结果。其余各栏分述如下:

- a) “损坏模式”(第(5)栏): 根据威胁机理的因素, 分析每一个重要部件在特定的威胁条件下可能产生的损坏模式。为了对损坏模式进行全面的分析, 至少应对表 24 所示的典型损坏模式(不局限于)进行分析。在确定损坏模式时, 应注意它与故障模式的差别。故障模式一般由产品本身或系统的故障机理所引起, 而损坏模式往往是由于战场环境下特定的外部因素而引发的。例如在飞机的寿命周期内, 燃油箱较少出现严重的故障模式, 因而在 FMEA 中, 燃油箱的故障模式往往不是分析的重点, 但在 DMEA 中, 由于燃油箱所暴露的体积大很容易受到敌方各种攻击而引起损坏。实践表明, 在战斗中需要更换燃油箱的概率要比平时高出一个数量级。

表 24 典型的损坏模式(不局限于)

序号	损坏模式	序号	损坏模式
1	穿透	9	碎片冲击
2	剥离	10	电击穿
3	裂缝	11	烧毁(敌方攻击起火引起)
4	断裂	12	毒气污染
5	卡住	13	细菌污染
6	变形	14	核污染
7	起火	15	局部过热
8	爆炸	16	其他

- b) “损坏影响”(第(6)~(8)栏): 损坏影响是指每个损坏模式对产品的使用、功能或状态所导致的后果。与 FMEA 一样, 损坏模式影响也分为局部的、高一层次的和最终影响。
- 1) “局部影响”(第(6)栏): 局部影响是指每个损坏模式对当前所分析的约定层次产品的使用、功能或状态的影响。其目的在于为制定改进措施、提高生存力/降低易损性提供依据;
 - 2) “高一层次影响”(第(7)栏): 高一层次影响是指每个损坏模式对被分析约定层次紧邻上一层次的产品使用、功能或状态的影响;
 - 3) “最终影响”(第(8)栏): 最终影响是指每个损坏模式对“初始约定层次”产品的使用、功能或状态总的的影响, 即对武器装备的能力和主要功能的影响, 以及生存力降低的程度。
- c) “改进措施”(第(9)栏): 改进措施是指针对各种损坏影响所采取的有效改进措施, 当武器装备受到损坏后, 能够快速恢复到某种程度的能力, 通常是采取某些应急措施加以解决。例如推迟(在战时对某些预防维修计划, 推迟到故障发生时才进行维修)、从简(在战时恶劣环境下采用临时“凑合”维修)、互换(对标准化的零部件)、置代(对标准化的零部件)、旁路(指某些通道被破坏后, 能用自动/手动快速形成一个新通道, 以实现产品的局部功能)、制作和临时配用(采用就地取材、手工制作)等, 其中某些措施在和平时期往往是不用或禁用的。
- d) “备注”(第(10)栏): 记录有关条款的注释、说明。

7.4 DMEA 的注意事项

主要包括:

- a) 明确 DMEA 与生存力的关系。生存力一般包括四个基本要素:
 - 1) 难以被敌方察觉(如隐形武器装备);
 - 2) 难以被敌方命中(如利用电子干扰设备);
 - 3) 难以被敌方击毁(如装甲防护或被覆);
 - 4) 遭损坏后, 但能迅速修复或自救(如自行撤离)。
 其中 3)、4) 是 DMEA 解决的主要问题, 即通过 DMEA 结果, 采取相应的有效措施, 提高武器装备的生存力。
- b) 明确威胁机理类似于 FMEA 中的故障机理, 它是造成产品损坏模式的根本原因。威胁机理分为直接机理和间接机理两种。由于威胁机理的复杂性和多样性, 在实施 DMEA 时, 往往选择一种或几种典型的威胁机理进行针对性的分析。
- c) 掌握 DMEA 与 FMEA 的关系。DMEA 是在 FMEA 基础上进行的。未进行 FMEA, 就不能进行 DMEA, 但 DMEA 和 FMEA 有其各自的侧重点: FMEA 是针对产品在使用过程中(含作战)可能出现的偶然故障和耗损故障; 而 DMEA 是针对产品在战场环境下出现各种战斗损坏。通过 FMEA 找出产品的薄弱环节加以改进而提高其可靠性; DMEA 是针对产品的损坏模式及影响加以改进, 一般不会显著地提高其可靠性, 但经过 DMEA 并采取措施, 产品的生存力和易损性将会大为改善。

- d) 明确 DMEA 在新研、现役装备中应用的重点。在新研武器装备寿命周期内均可采用 DMEA 技术, 为提高新研武器装备的生存力提供依据。对现役武器装备, 可根据订购方要求进行 DMEA, 以确定装备中的系统、分系统和设备是否达到预定要求, 也可以利用生存力的有关信息进行 DMEA, 以确定现役武器装备在敌我环境中是否能有效地工作。

8 过程 FMECA

8.1 概述

过程 FMECA 可应用于产品生产过程、使用操作过程、维修过程、管理过程等。目前应用较多和比较成熟的是产品加工过程的工艺 FMECA。本标准仅涉及工艺 FMECA。

8.2 工艺 FMECA 的目的与步骤

8.2.1 工艺 FMECA 的目的

工艺 FMECA 的目的是在假定产品设计满足要求的前提下, 针对产品在生产过程中每个工艺步骤可能发生的故障模式、原因及其对产品造成的所有影响, 按故障模式的风险优先数 (RPN) 值的大小, 对工艺薄弱环节制定改进措施, 并预测或跟踪采取改进措施后减少 RPN 值的有效性, 使 RPN 达到可接受的水平, 进而提高产品的质量和可靠性。

8.2.2 工艺 FMECA 的步骤

工艺 FMECA 的步骤见图 13。

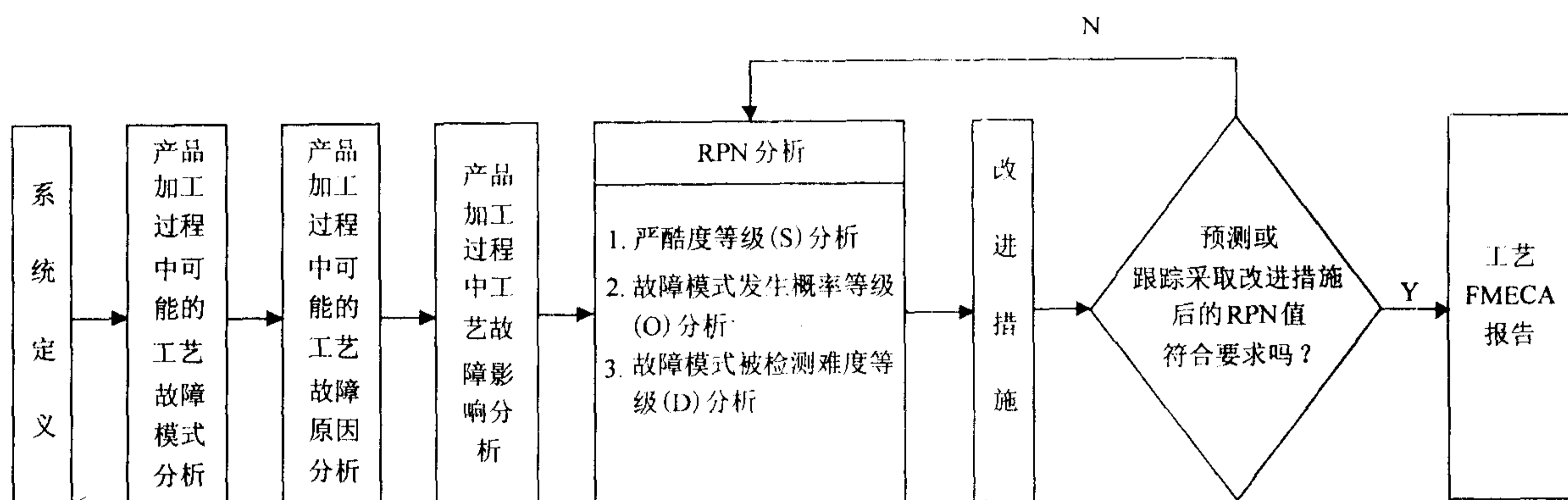


图 13 工艺 FMECA 的步骤

8.3 工艺 FMECA 步骤的主要内容

8.3.1 系统定义

与“功能及硬件 FMECA”一样, 工艺 FMECA 也应对分析对象进行定义。其内容可概括为功能分析、绘制“工艺流程表”及“零部件-工艺关系矩阵”。

- a) 功能分析: 对被分析过程的目的、功能、作用及有关要求等进行分析;
- b) 绘制“工艺流程表”及“零部件-工艺关系矩阵”;
 - 1) 绘制“工艺流程表”, 见表 25。它表示各工序相关的工艺的流的功能和要求。它是工艺 FMECA 的准备工作;

表 25 工艺流程表

零部件名称 零部件号 装备名称/型号	生产过程 部门名称 分析人员	审核 批准	第 页·共 页 填表日期
工艺流程	输入		输出结果
工序 1			
工序 2			
...			

2) 绘制“零部件-工艺关系矩阵”，见表 26。它表示“零部件特性”与“工艺操作”各工序间的关系。

表 26 零部件-工艺关系矩阵

零部件名称 零部件号 装备名称/型号	生产过程 部门名称 分析人员	审核 批准	第 页·共 页 填表日期	
零部件特性	工 艺 操 作			
	工序 1	工序 2	工序 3	...
特性 1				
特性 2				
特性 3				
...				

“工艺流程表”、“零部件-工艺关系矩阵”均应作为工艺 FMECA 报告的一部分。

8.3.2 工艺故障模式分析

工艺故障模式是指不能满足产品加工、装配过程要求和/或设计意图的工艺缺陷。它可能是引起下一道(下游)工序故障模式的原因，也可能是上一道(上游)工序故障模式的后果。一般情况下，在工艺 FMECA 中，不考虑产品设计中的缺陷。典型的工艺故障模式示例(不局限于)见表 27。

表 27 典型的工艺故障模式示例(不局限于)

(1)	弯曲	(7)	尺寸超差	(13)	表面太光滑
(2)	变形	(8)	位置超差	(14)	未贴标签
(3)	裂纹	(9)	形状超差	(15)	错贴标签
(4)	断裂	(10)	(电的)开路	(16)	搬运损坏
(5)	毛刺	(11)	(电的)短路	(17)	脏污
(6)	漏孔	(12)	表面太粗糙	(18)	遗留多余物

注：工艺故障模式应采用物理的、专业性的术语，而不要采用所见的故障现象进行故障模式的描述。

8.3.3 工艺故障原因分析

工艺故障原因是指与工艺故障模式相对应的工艺缺陷为何发生。其典型的工艺故障原因示例(不局限于)见表 28。

表 28 典型的工艺故障原因示例(不局限于)

(1)	扭矩过大、过小	(11)	工具磨损
(2)	焊接电流、功率、电压不正确	(12)	零件漏装
(3)	虚焊	(13)	零件错装
(4)	铸造浇口/通气口不正确	(14)	安装不当
(5)	粘接不牢	(15)	定位器磨损
(6)	热处理时间、温度、介质不正确	(16)	定位器上有碎屑
(7)	量具不精确	(17)	破孔
(8)	润滑不当	(18)	机器设置不正确
(9)	工件内应力过大	(19)	程序设计不正确
(10)	无润滑	(20)	工装或夹具不正确

8.3.4 工艺故障影响分析

工艺故障影响是指与工艺故障模式相对应的工艺缺陷对“顾客”的影响。“顾客”是指下道工序/后续工序，和/或最终使用者。工艺故障影响可分为下道工序、组件和装备的影响。

a) 对下道工序/后续工序而言：工艺故障影响应该用工艺/工序特性进行描述，见表 29(不局限于)；

表 29 典型的工艺故障影响示例(对下道工序/后续工序而言)

(1)	无法取出	(6)	无法配合
(2)	无法钻孔/攻丝	(7)	无法加工表面
(3)	不匹配	(8)	导致工具过程磨损
(4)	无法安装	(9)	损坏设备
(5)	无法连接	(10)	危害操作者

b) 对最终使用者而言：工艺故障影响应该用产品的特性进行描述，见表 30(不局限于)。

表 30 典型的工艺故障影响示例(对最终使用者而言)

(1)	噪音过大	(9)	工作性能不稳定
(2)	振动过大	(10)	损耗过大
(3)	阻力过大	(11)	漏水
(4)	操作费力	(12)	漏油
(5)	散发讨厌的气味	(13)	表面缺陷
(6)	作业不正常	(14)	尺寸、位置、形状超差
(7)	间歇性作业	(15)	非计划维修
(8)	不工作	(16)	废弃

8.3.5 风险优先数(RPN)分析

风险优先数(RPN)是工艺故障模式的严酷度等级(S)、工艺故障模式的发生概率等级(O)和工艺故障模式的被检测难度等级(D)的乘积，即

$$RPN=S \times O \times D \dots\dots\dots (6)$$

RPN 是对工艺潜在故障模式风险等级的评价，它反映了对工艺故障模式发生的可能性及其后果严重性的综合度量。RPN 值越大，即该工艺故障模式的危害性越大。

a) 工艺故障模式严酷度等级(S)：是指产品加工、装配过程中的某个工艺故障模式影响的严重程度。其等级的评分准则见表 31；

表 31 工艺故障模式的严酷度等级(S)的评分准则

影响程度	工艺故障模式的最终影响(对最终使用者而言)	工艺故障模式的最终影响(对下道作业/后续作业而言)	严酷度等级(S)的评分等级
灾难的	产品毁坏或功能丧失	人员死亡/严重危及作业人员安全及重大环境损害	10、9
严重的	产品功能基本丧失而无法运行/能运行但性能下降/最终使用者非常不满意	危及作业人员安全、100%产品可能废弃/产品需在专门修理厂进行修理及严重环境损害	8、7
中等的	产品能运行，但运行性能下降/最终使用者不满意，大多数情况(>75%)发现产品有缺陷	可能有部分(<100%)产品不经筛选而被废弃/产品在专门部门或下生产线进行修理及中等程度的环境损害	6、5、4
轻度的	有 25%~50%的最终使用者可发现产品有缺陷、或没有可识别的影响	导致产品非计划维修或修理	3、2、1

b) 工艺故障模式的发生概率等级(O)：是指某个工艺故障模式发生的可能性。发生概率等级(O)的级别数在工艺 FMECA 范围中是一个相对比较的等级，不代表工艺故障模式真实的发生概

率。其评分准则见表 32；

表 32 工艺故障模式的发生概率等级(O)的评分准则

工艺故障模式发生的可能性	可能的工艺故障模式发生的概率(P_o)	发生概率等级(O)的评分等级
很高(持续发生的故障)	$P_o \geq 10^{-1}$	10
	$5 \times 10^{-1} \leq P_o < 10^{-1}$	9
高(经常发生的故障)	$2 \times 10^{-2} \leq P_o < 5 \times 10^{-1}$	8
	$1 \times 10^{-2} \leq P_o < 2 \times 10^{-2}$	7
中等(偶尔发生的故障)	$5 \times 10^{-3} \leq P_o < 1 \times 10^{-2}$	6
	$2 \times 10^{-3} \leq P_o < 5 \times 10^{-3}$	5
	$1 \times 10^{-3} \leq P_o < 2 \times 10^{-3}$	4
低(很少发生的故障)	$5 \times 10^{-4} \leq P_o < 1 \times 10^{-3}$	3
	$1 \times 10^{-4} \leq P_o < 5 \times 10^{-4}$	2
极低(不大可能发生故障)	$P_o < 1 \times 10^{-4}$	1

- c) 工艺故障模式的被检测难度等级(D): 是指产品加工过程控制中工艺故障模式被检测出的可能性。被检测难度等级(D)也是一个相对比较的等级。为了得到较低的被检测难度数值, 产品加工、装配过程需要不断地改进。其评分准则见表 33。

表 33 工艺故障模式被检测难度等级(D)的评分准则

被检测难度	评分准则	检查方式			推荐的被检测难度的方法	被检测难度等级(D)的评分等级
		A	B	C		
几乎不可能	无法检测			√	无法检测或无法检查	10
很微小	现行检测方法几乎不可能检测出			√	以间接的检查进行检测	9
微小	现行检测方法只有微小的机会去检测出			√	以目视检查来进行检测	8
很小	现行检测方法只有很小的机会去检测出			√	以双重的目视检查进行检测	7
小	现行检测方法可以检测		√	√	以现行检测方法进行检测	6
中等	现行检测方法基本上可以检测出		√		在产品离开工位之后以量具进行检测	5
中上	现行检测方法有较多机会可以检测出	√	√		在后续的工序中实行误差检测, 或进行工序前测定检查进行检测	4
高	现行检测方法很可能检测出	√	√		在当场可以测错, 或在后续工序中检测(如库存、挑选、设置、验证)。不接受缺陷的产品	3
很高	现行检测方法几乎肯定可以检测出	√	√		当场检测(有自动停止功能的自动化量具)。缺陷产品不能通过	2
肯定	现行检测方法肯定可以检测出	√			过程/产品设计了防错措施, 不会生产出有缺陷的产品	1

注: 检查方式: A-采用防错措施; B-使用量具测量; C-人工检查。

8.3.6 改进措施

改进措施是指以减少工艺故障模式的严酷度等级(S)、发生概率等级(O)和被检测难度的等级(D)为出发点的任何工艺改进措施。一般不论工艺故障模式 RPN 的大小如何, 对严酷度等级(S)为 9 或 10 的项目应通过工艺设计上的措施或产品加工、装配过程控制或预防/改进措施等手段, 以满足降低该风险的要求。在所有的状况下, 当某个工艺故障模式的后果可能对制造/组装人员产生危害时, 应该采取

预防/改进措施,以排除、减轻、控制或避免该工艺故障模式的发生。对确无改进措施的工艺故障模式,则应在工艺 FMECA 表相应栏中填写“无”。

8.3.7 RPN 值的预测或跟踪

制定改进措施后,应进行预测或跟踪改进措施执行后的落实结果,对工艺故障模式严酷度等级(S)、工艺故障模式的发生概率等级(O)和工艺故障模式被检测难度等级(D)的变化情况进行分析,并计算相应的 RPN 值是否符合要求。当不满足要求时,应进一步改进,并按上述步骤反复进行,直到 RPN 值满足最低可接受水平为止。

8.3.8 工艺 FMECA 报告

将工艺 FMECA 分析结果归纳、整理成技术报告。其主要内容包括:概述、产品加工、装配等过程的描述、系统定义、工艺 FMECA 表格的填写、结论及建议、附表(如“工艺流程表”、“零部件-工艺关系矩阵”)等。

8.4 工艺 FMECA 的实施

实施工艺 FMECA 的主要工作是填写工艺 FMECA 表(见表 34)。应用时,可根据实际情况对表 34 的内容进行增、删。

表 34 工艺 FMECA 表

产品名称(标识)(1)				生产过程(3)				审核			第 页·共 页							
所属装备/型号(2)				分析人员				批准			填表日期							
工序名称	工序功能/要求	故障模式	故障原因	故障影响			改进前的风险优先数(RPN)				改进措施	责任部门	改进措施执行情况	改进措施执行后的风险优先数(RPN)				备注
				下道工序影响	组件影响	装备影响	严酷度等级(S)	发生概率等级(O)	被检测难度等级(D)	RPN				严酷度等级(S)	发生概率等级(O)	被检测难度等级(D)	RPN	
(4)	(5)	(6)	(7)	(8)			(9)				(10)	(11)	(12)	(13)				(14)

表 34 中各标号的填写说明如下:

- (1) ——产品名称(标识):是指被分析的产品名称与标识(如产品代号、工程图号等);
- (2) ——所属装备/型号:是指被分析的产品安装在哪一种装备/型号上,如果该产品被多个装备/型号选用,则一一列出;
- (3) ——生产过程:是指被分析产品生产过程的名称(如××加工、××装配);
- (4) ——工序名称:是指被分析生产过程的产品加工、装配过程的步骤名称,该名称应与工艺流程表中的各步骤名称相一致;
- (5) ——工序功能/要求:是指被分析的工艺或工序的功能(如车、铣、钻、攻丝、焊接、装配等),并记录被分析产品的相关工艺/工序编号。如果过程包括很多不同故障模式的工序(例如装配),则可以把这些工序以独立项目逐一列出;
- (6) ——故障模式:按 8.3.2 节的要求填写;
- (7) ——故障原因:按 8.3.3 节的要求填写;
- (8) ——故障影响:按 8.3.4 节的要求填写;
- (9) ——改进前的风险优先数(RPN):按 8.3.5 节的要求填写;
- (10) ——改进措施:按 8.3.6 节的要求填写;
- (11) ——责任部门:是指负责改进措施实施的部门和个人,以及预计完成的日期;
- (12) ——改进措施执行情况:是指实施改进措施后,简要记录其执行情况;
- (13) ——改进措施执行后的风险优先数(RPN):按 8.3.7 节的要求填写;
- (14) ——备注:是指对各栏的注释和补充。

8.5 工艺 FMECA 的注意事项

主要包括:

- a) 掌握工艺 FMECA 的时机与适用范围:在产品工艺可行性分析、生产工装准备之前,从零部件到系统均应进行工艺 FMECA 工作。工艺 FMECA 主要是考虑产品试制生产过程的分析,也可能包括包装、贮存、运输等其他过程的工艺 FMECA。
- b) 明确工艺 FMECA 与设计的关系:工艺 FMECA 中的缺陷不能全靠更改产品设计来克服,主要是从工艺设计和工艺 FMEA 中采取有效措施加以解决,并应坚持“谁工艺设计、谁分析”的原则。在工艺 FMECA 中应充分考虑产品设计特性,根据需要,邀请产品设计人员参与分析工作,并促进不同部门之间充分交换意见,以最大限度地确保产品满足“顾客”的需求。
- c) 掌握工艺 FMECA 的迭代过程:工艺 FMECA 是对工艺故障模式的风险优先数(RPN)值的大小进行优先排序,并对关键过程采取有效的改进措施,进而对改进后的 RPN 进行跟踪,直到 RPN 值满足可接受水平为止。工艺 FMECA 是一个动态的、反复迭代分析的过程。
- d) 积累经验、注重信息。与设计 FMECA 一样,工艺 FMECA 亦应从相似生产工艺或工序中,积累有关工艺故障模式、原因、严酷度等级(S)、发生概率等级(O)和被检测难度等级(D)等信息,并建立相应的数据库,为有效开展工艺 FMECA 提供支持。

附录 A
(资料性附录)
功能 FMECA 的应用案例

A.1 系统定义

A.1.1 功能分析

某型通信系统的通信接收机分系统的功能是接受航空地面控制塔台发出的信号,并转换为驾驶员能听到的声音信号。任务是接收通信信号,其功能原理见图 A.1。

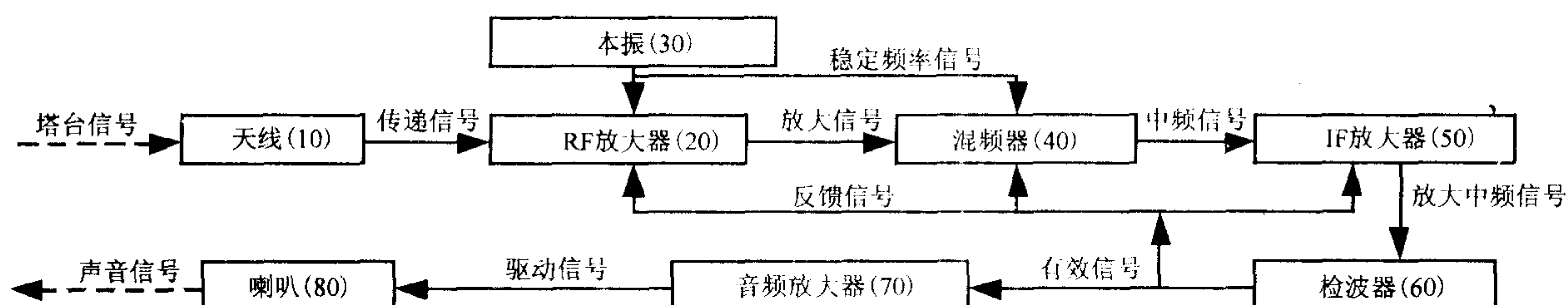


图 A.1 某型通信接收机分系统的功能原理图

A.1.2 绘制功能框图、任务可靠性框图

a) 绘制功能框图——某型通信接收机分系统的功能层次与结构层次对应图见图 A.2。

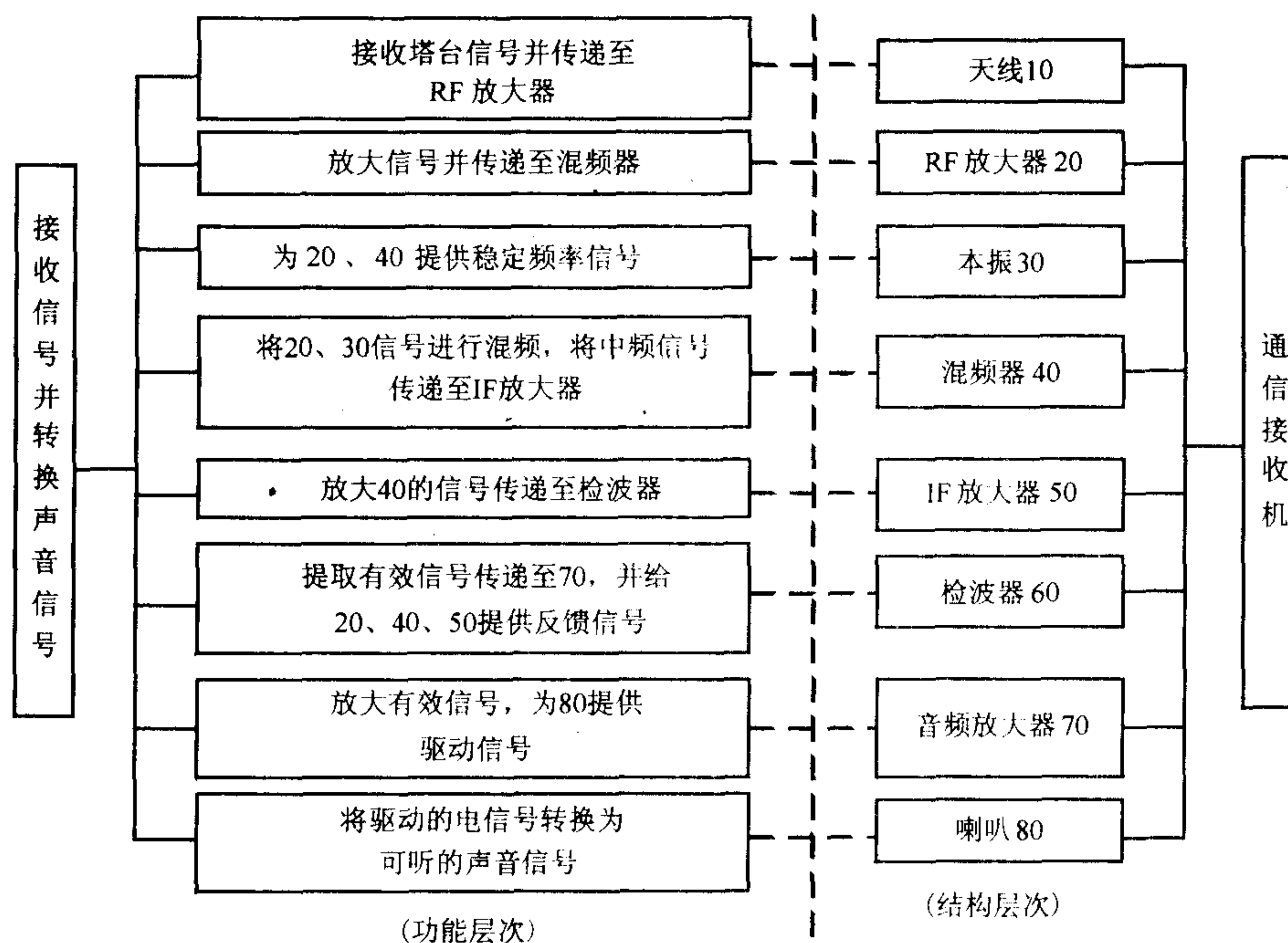


图 A.2 某型通信接收机分系统功能层次及结构层次对应图

b) 绘制任务可靠性框图——某型通信接收机分系统的任务可靠性框图见图 A.3。

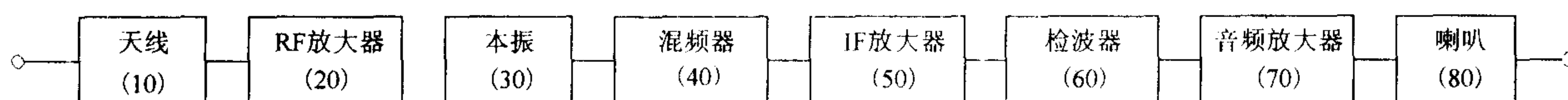


图 A.3 某型通信接收机分系统的任务可靠性框图

A.2 约定层次

初始约定层次为通信系统；约定层次为通信接收机分系统；最低约定层次为天线(10)、RF 放大器(20)、……、喇叭(80)等。

A.3 严酷度定义

根据通信接收机分系统的每个功能故障模式对通信系统的最终影响程度，确定其严酷度。严酷度类别及定义见表 A.1。

表 A.1 某型通信系统严酷度的类别及定义

严酷度类别	严重程度定义
I	引起通信系统与控制塔台的通信接收能力完全丧失
II	引起通信系统与控制塔台的通信接收能力下降
III	引起通信系统不能正确地向操作者报告接收机的工作状态
IV	对通信系统接收无影响，但会导致非计划维修

A.4 故障模式分析

通信接收机分系统的故障模式主要从有关信息中分析得到。故障模式发生概率的等级分为 A、B、C、D、E 五级，其具体定义见表 14 的规定。

A.5 填写功能 FMECA 表

根据本案例的特点，将 FMEA 表、CA 表合并成“某型通信接收机分系统功能 FMECA 表”，其结果见表 A.2。

A.6 绘制危害性矩阵图

根据表 A.2 结果，绘制通信接收机分系统的定性危害性矩阵图(见图 A.4)。

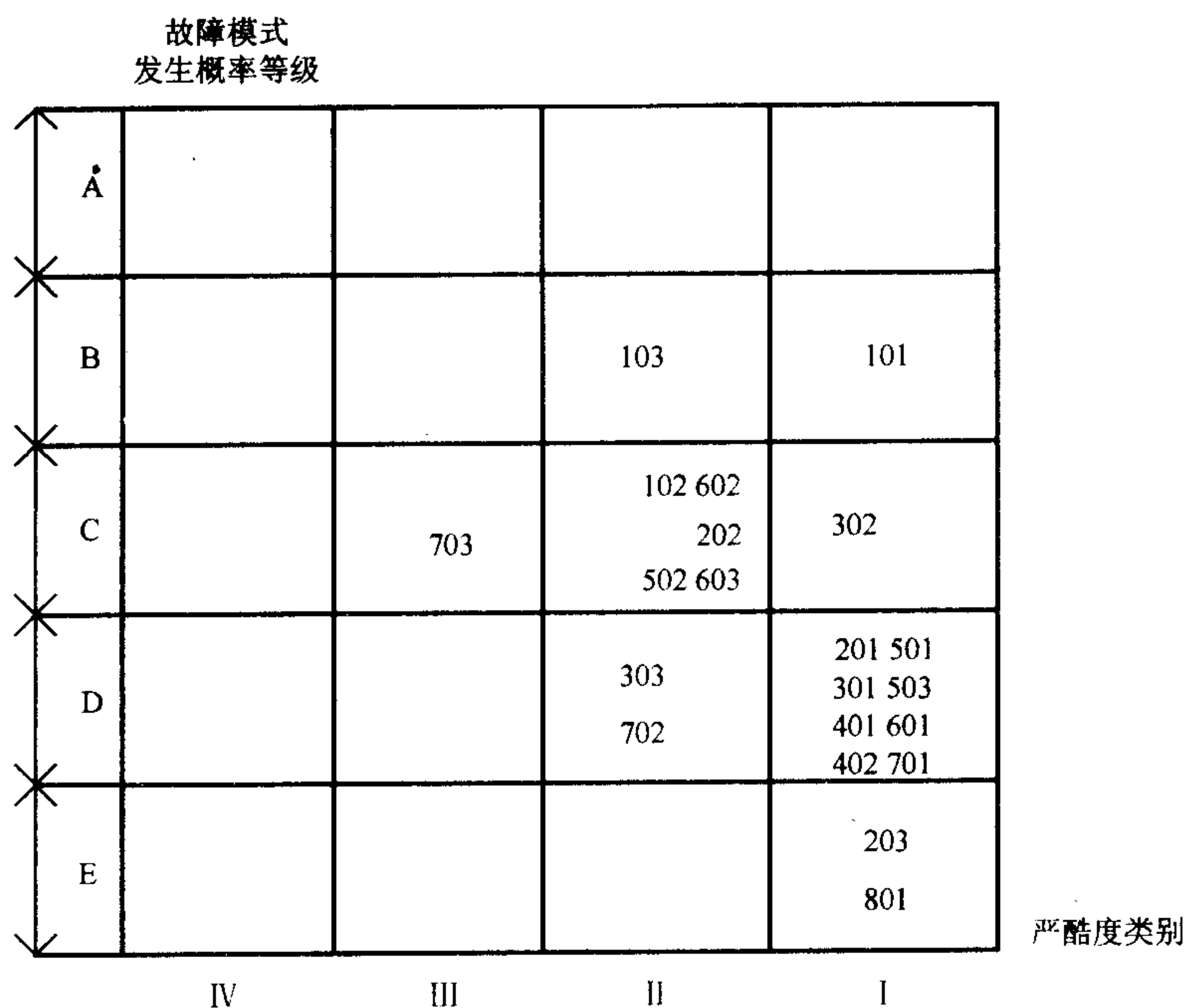


图 A.4 某型通信接收机分系统的危害性矩阵图

A.7 结论与建议

A.7.1 结论

从表 A.2、图 A.4 得知，某通信接收机分系统共 21 个故障模式，其中严酷度为 I 类的有 12 个、II 类的有 8 个，但考虑故障模式发生概率的因素，危害性最大的是故障模式识别号为 101(天线不能接收信号)、302(本振错误输出)和 103(天线乱真接收)，对它们均可定为关键的故障模式。

A.7.2 建议

针对识别号为 101、103 的故障模式，增设一个接收天线作为冗余系统，以避免通信系统功能丧失；在本振设计中选用高质量的元器件，以消除或减少本振的参数漂移，提高其稳定性，这将对该接收机完成任务功能具有重要作用。该接收机基本上均是严酷度为 I 类、II 类的故障模式，除选用高质量元器件和严格对元器件实施质量管理外，在飞机上增设一套备份的无线电通信方式，作为设计补偿措施。

本案例的 FMECA 报告等，略。

表 A.2 某型通信接收机分系统功能 FMECA 表

初始约定层次: 某型通信系统 任务: 接收通信信号 分析人员: ×××× 任务: 接收通信信号 审核: ×××× 任务: 接收通信信号 批准: ××××
 约定层次: 通信接收机分系统 填表日期: 2004年12月18日

第 1 页 · 共 2 页

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		原因	任务阶段与工作模式	故障影响			严酷度类别	故障模式等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响					
10	天线输出	接收控制塔台发射的信号,并传递至放大器	101	不能接收信号	接收频率不够,信号太弱	接收通信信号	不能接收输入的信号	通信接收机丢失信号	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	B	BITE声音报警	增加冗余	启动冗余措施
			102	信号泄漏	波导泄漏		接收信号不正确或不完善	信号接收困难,通信接收机性能下降	II	C	监测仪检测			
			103	乱真接收	阻抗不匹配		接收信号不完整	信号接收困难,通信接收机性能下降	II	B	听觉			
20	RF放大器输出	接收、放大器进入的信号并传递至混频器	201	无输出	断路	接收通信信号	丢失天线来的信号	混频器无信号输入	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D	BITE声音报警	选用高质量元件加强二次筛选	视情判断
			202	电压增益不够	放大器增益下降		接收信号弱	给混频器的信号太弱	信号接收困难,通信接收机性能下降	II	C	听觉		
			203	丧失RF调谐能力	调谐回路故障		不能调谐天线来的信号	给混频器提供不正确的信号	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	E	无		
30	本振输出	为放大器和混频器提供一个稳定的频率信号	301	无输出	振荡器故障	接收通信信号	本振故障	混频器输出错误	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D	BITE声音报警	选用高质量元件加强二次筛选	视情判断
			302	输出错误	振荡器参数超差		本振输出频率错误	混频器输出错误	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	C	无		
			303	间歇输出	接触不良		间歇输出信号	混频器间歇输出信号	信号接收困难,通信接收机性能下降	II	D	听觉		
40	混频器输出	将进入信号和本振信号,产生一个稳定的中频信号	401	无输出	断路	接收通信信号	丢失中频信号	丢失IF放大器的信号	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D	BITE声音报警	选用高质量元件加强二次筛选	视情判断
			402	输出错误	参数超差		混频器输出错误	给IF放大器信号错误	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D			
			501	无输出	断路		丢失中频信号	丢失给检波器的信号	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D	BITE声音报警		
50	IF放大器输出	放大由混频器产生的中频信号	502	电压增益不够	放大器增益下降	接收通信信号	中频信号弱	给检波器的信号弱	信号接收困难,通信接收机性能下降	II	C		听觉	视情判断
			503	调谐能力丧失	调谐回路故障		不能调谐中频信号	给检波器的中频信号错误	通信丧失,与控制塔台失去联系	I	D	BITE声音报警		

表 A.2 (续)

初始约定层次: 某型通信系统
 约定层次: 通信接收机分系统
 任务: 接收通信信号
 分析人员: ××××
 审核: ××××
 批准: ××××
 填表日期: 2004年12月18日

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		原因	任务阶段 与工作模式	故障影响			严酷度类别	故障模式 等级	故障检测 方法	设计 改进 措施	使用 补偿 措施
			识别号	模式			局部影响	高层次影响	最终影响					
60	检波器 输出	从放大的 中频信号中 提取有效信 号,并传递 至音频放大 器,同时提供 反馈信号	601	无输出	对地短路	接 收 通 信 信 号	丢失进入的 信号	丢失给音频 放大器的信号	通信丧失,与控制 塔台失去联系	I	D	BITE声 音报警	选用高 质量元 器件加 强二次 筛选提 高检波 器的可 靠性	视情判断
			602	间歇输出	检波参数超差		通信信号 时断时续	音频放大器信号 时断时续	信号接收困难,通信 接收机性能下降	II	C	听觉		
			603	反馈信号 丢失	输出断路		前面级无 反馈信号	丧失反馈 控制能力	信号接收困难,通信 接收机性能下降	听觉				
70	音频放 大器输 出	放大有效信 号,并为喇叭 提供驱动信 号	701	无输出	输出开路	接 收 通 信 信 号	丢失通信信号	喇叭无输出	通信丧失,与控制 塔台失去联系	I	D	BITE声 音报警	选用高 质量元 器件加 强二次 筛选	视情判断
			702	间歇输出	参数不稳定		通信信号 不稳定	喇叭间歇输出	信号接收困难,通信 接收机性能下降	II	D	听觉		
			703	电压增益 不够	放大器 增益下降		通信信号 放大不够	喇叭输出弱	通信接收机性能下降, 低音信号接收困难	听觉	C			
80	喇叭输 出	接收驱动信 号,并将电信 号转换为声 音信号	801	无输出	输出断路	接 收 通 信 信 号	喇叭输出 信号丢失	信号接收失效	通信丧失,与控制 塔台失去联系	I	E	声音 报警	增加 冗余	启动冗余 措施

附录 B
(资料性附录)
硬件 FMECA 的应用案例

B.1 系统定义

该系统的定义是:

- a) 功能及组成: 某型军用飞机升降舵分系统的功能是保证飞机的纵向操纵性。它是由安定面支承、轴承组件、扭力臂组件、操纵组件、配重组件和调整片所组成, 见图 B.1;
- b) 约定层次: “初始约定层次” 为某军用飞机; “约定层次” 最低约定层次的划分见图 B.1;

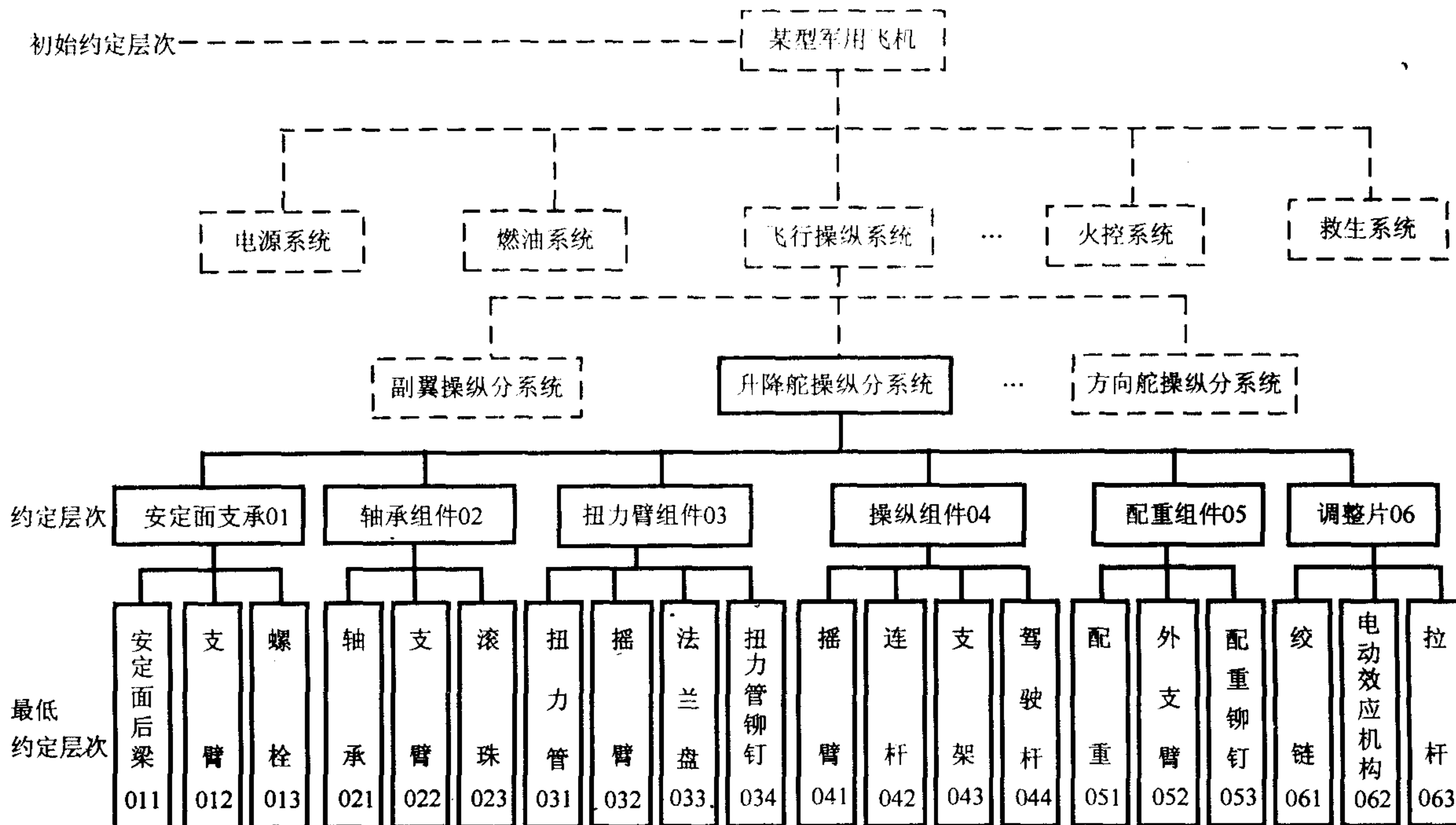


图 B.1 某型军用飞机升降舵操纵分系统的组成

- c) 绘制功能层次与结构层次对应图(图 B.2)、任务可靠性框图(图 B.3);
- d) 严酷度类别的定义: 结合航空产品的特点, 该军用飞机严酷度类别的定义见表 B.1;

表 B.1 某型军用飞机严酷度类别的定义

严酷度类别	严重程度定义
I类(灾难的)	危及人员或飞机安全(如一等、二等飞行事故及重大环境损害)
II类(致命的)	人员损伤或飞机部分损坏(如三等飞行事故及严重环境损害)
III类(中等的)	人员中等程度伤害或影响任务完成(如延误飞行、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

- e) 信息来源: FMECA 分析中的故障模式、原因、故障率 λ_p 等, 基本上是根据对多个相似军用飞机群的现场、厂内信息进行调研、整理、归纳和分析后获得的。

B.2 填写 FMECA 表

根据本例的实际情况, 将 FMEA、CA 表合并成 FMECA 表。该表简明、直观和减少了工作量, 其

填写结果见表 B.2。

B.3 结论

通过 FMECA 找出了该升降舵的薄弱环节, 并采取了有针对性的有效改进措施, 进而提高了该升降舵的可靠性, 为确保该军用飞机首飞成功提供了技术支持。

本案例的危害性矩阵图、FMECA 报告等, 略。

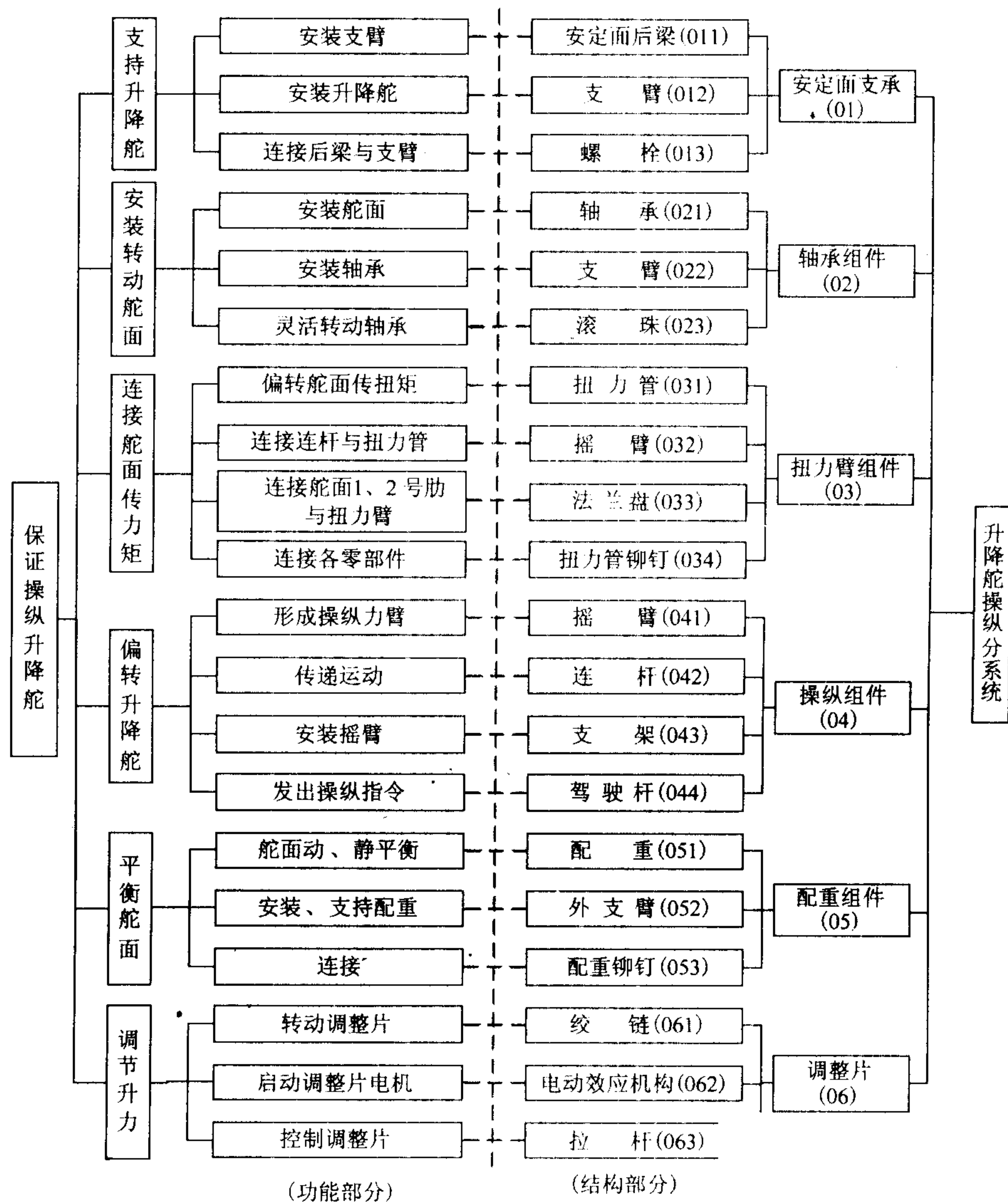


图 B.2 某型军用飞机升降舵操纵分系统功能层次与结构层次对应图

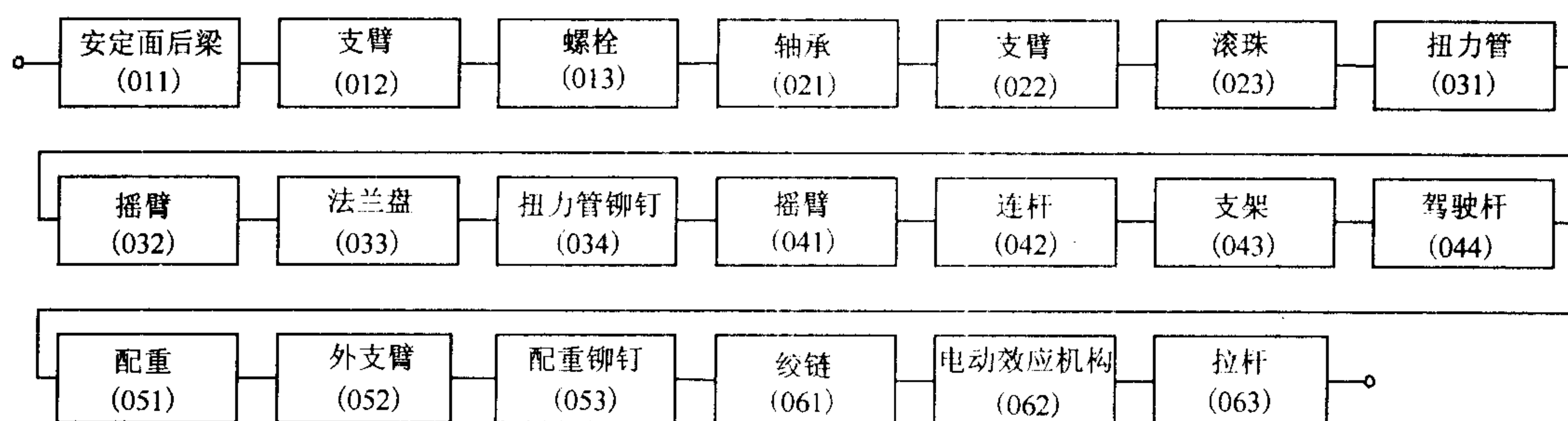


图 B.3 某型军用飞机升降舵操纵分系统任务可靠性框图

表 B.2 某型军用飞机升降舵操纵舵分系统 FMECA 表

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	故障检验方法	设计改进措施	使用补偿措施	故障率 λ_p 来源	故障模式危害度 C_m				产品危害度 (1×10^{-6})	
						局部影响	高一层次影响	最终影响						α	β	λ_p (1×10^{-6}) (1/h)	t (h)		$\alpha\beta\lambda_p t$ (1×10^{-6})
01	安定面支承升降舵 (01)	支承升降舵	安定面后梁变形过大	刚度不够	飞行	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	增加结构抗弯刚度	功能检查	统计	0.02	0.8	15.6	0.33	0.0824	II类:0.0824 III类:0.252 IV类:0.0252
			支臂裂纹	疲劳	飞行	故障征候	故障征候	影响任务完成	III	目视检查或无损检伤	增加抗疲劳强度	增加裂纹视情检查	统计	0.49	0.1	15.6	0.33	0.252	
			螺栓锈蚀	长期使用腐蚀	飞行	故障征候	影响很小	无影响	IV	目视检查	改进表面处理	定期维修	统计	0.49	0.01	15.6	0.33	0.0252	
02	轴承组件 (02)	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	调整尺寸公差	加强润滑	统计	0.89	0.8	79.91	0.33	18.776	I类:2.611 II类:18.776
			滚珠掉出	磨损	飞行	丧失功能	丧失功能	危及飞机安全	I	无	选高质量轴承	润滑更换	统计	0.11	0.9	79.91	0.33	2.611	
03	扭力臂组件 (03)	连接舵面传力矩	扭力臂连接孔松动	舵面振动冲击载荷;长期使用	飞行	功能下降	功能下降(舵面偏转不到位)	损伤飞机	II	视情检查	提高扭转刚度	增加视情检查	统计	0.5	0.8	15.22	0.33	2.009	II类:2.009 III类:0.2512
			摇臂裂纹	疲劳	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视检查或无损检伤	增加抗疲劳强度	增加视情检查	统计	0.25	0.1	15.22	0.33	0.1256	
			法兰盘裂纹	疲劳	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视检查	调整尺寸公差	润滑更换	统计	0.25	0.1	15.22	0.33	0.1256	
04	操纵组件 (04)	偏转舵面	摇臂间隙过大	磨损	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视检查	调整尺寸公差	润滑更换	统计	0.18	0.1	14.84	0.33	0.0881	II类:1.724 III类:0.2742
			连杆间隙过大	磨损	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视检查	增加抗疲劳强度	视情检查	统计	0.25	0.1	14.84	0.33	0.1224	
			支架裂纹	疲劳	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视、无损检伤	增加抗疲劳强度	视情检查	统计	0.13	0.1	14.84	0.33	0.0637	

初始约定层次: 某型军用飞机
约定层次: 升降舵操纵舵分系统

任务: 飞行
分析: $\times \times \times$

审核: $\times \times \times$
批准: $\times \times \times$

填表日期: 2004年11月20日

第 1 页 · 共 2 页

表 B.2 (续)

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	故障方法	设计改进措施	使用补偿措施	故障率 λ_p 来源	故障模式危害度 C_m				产品危害度 (1×10^{-6})	
						局部影响	高一层次影响	最终影响						α	β	λ_p (1×10^{-6}) (1/h)	t (h)		$\alpha\beta\lambda_p t$ (1×10^{-6})
04	操纵组件 (04)	偏转舵面	驾驶杆行程过大	摇臂连杆长期磨损形成间隙后综合结果	飞行	功能下降	功能下降 (舵面操纵不到位)	损伤飞机	II	视情检查	调整尺寸公差	润滑定期维护	统计	0.44	0.8	14.84	0.33	1.724	II类: 1.724 III类: 0.2742
05	配重组件 (04)	平衡舵面	配重松动	振动引起连接处间隙过大	飞行	功能下降	功能下降	损伤飞机	II	视情检查	改进设计	视情检查	统计	0.67	0.8	34.25	0.33	6.058	II类: 6.058 III类: 0.3729
			外文臂裂纹	疲劳	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视、无损检查	增加抗疲劳强度	视情检查	统计	0.11	0.1	34.25	0.33	0.1243	
			铆钉锈蚀	长期使用腐蚀	飞行	故障征候	故障征候	故障征候	III	目视检查	无	视情检查	统计	0.22	0.1	34.25	0.33	0.2487	
06	调整片 (06)	调节升力	铰链松动	磨损	飞行	功能下降	功能下降	损伤飞机	II	视情检查	无	功能检查	统计	0.25	0.8	30.44	0.33	2.009	I类: 3.390 II类: 5.023
			电动效应机构不工作	电门接触不良 (有积炭)	起飞、着陆	丧失功能	丧失功能	危及飞机安全	I	视情检查	增加触点灭弧功能	定期维修	统计	0.375	0.9	30.44	0.33	3.390	
			拉杆断	疲劳	飞行	丧失功能	丧失功能	损伤飞机	II	无	增加抗疲劳强度	无	统计	0.375	0.8	30.44	0.33	3.014	

第 2 页 · 共 2 页

审核: ×××

任务: 飞行

初始约定层次: 某型军用飞机

填表日期: 2004 年 11 月 20 日

批准: ×××

分析: ×××

约定层次: 升降舵操纵分系统

附录 C
(资料性附录)

嵌入式软件 FMECA 的应用案例

C.1 系统定义

某型号软件通信模块由 FC 系统、DY 系统、GD 系统等组成，其中 FC 系统和 DY 系统之间的通信方式为：总线的物理接口采用 EIA-RS-485 标准，数据链路层采用 SDLC (同步数据链路控制) 协议，FC 系统为主动方，DY 系统为被动方。

以下以 DY 系统中通信模块 INT0-ISR 为例进行 SFMECA，其约定层次见图 C.1。

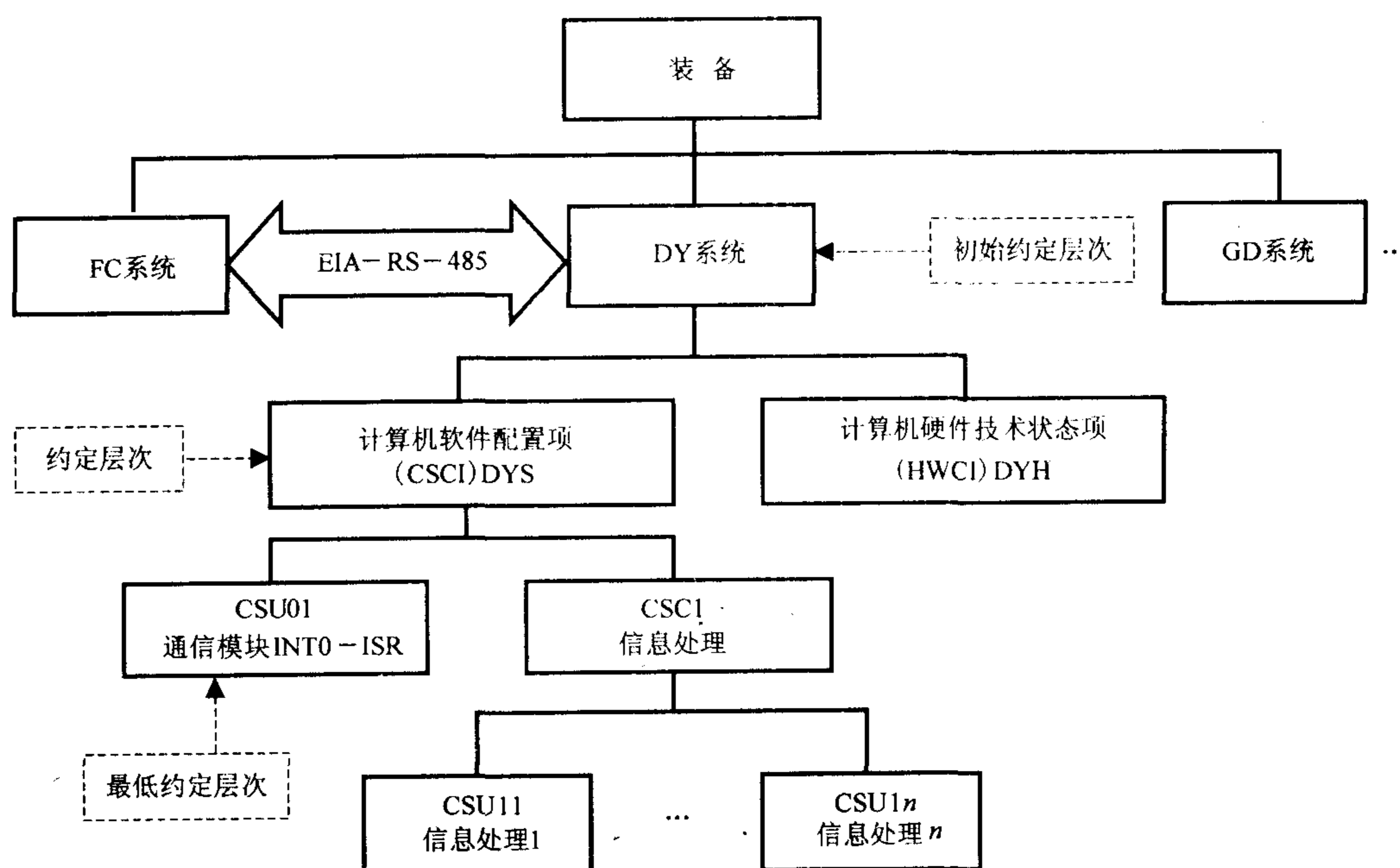


图 C.1 某型号软件通信模块约定层次图

DY 系统软件 (TMS320C25) 按系统的通信协议完成与 FC 系统的通信。总线通信控制器自动完成一帧数据的接收，存入数据缓存区，并产生中断 (INT0) 通知 CPU 从数据缓存区中读取数据。CPU 读取完数据后，将准备好的发送数据写至数据缓存区，写完后通知总线通信控制器自动完成一帧数据的发送。CRC (循环冗余码校验) 由外围电路完成判别，其结果通过数据线上的相应位进行标识。

DY 系统的通信协议约定为：

a) 帧格式定义

帧格式定义见表 C.1。

表 C.1 帧格式定义

帧头	接收站地址 (1 字节)	发送站地址 (1 字节)	命令 (1 字节)	信息 (N 字节)	CRC 校验 (1 字节)	帧尾
----	-----------------	-----------------	--------------	--------------	------------------	----

b) 内容约定

内容约定见表 C.2。

表 C.2 内容约定

接收或发送	内 容	约 定
接收	接收站地址	54H
	发送站地址	52H
	命令	30H、31H
	信息	30H时 $N=1$ ，31H时 $N=45$
发送	接收站地址	52H
	发送站地址	54H
	命令	接收命令 30H 时，回送命令 30H 接收命令 31H 时，回送命令 31H
	信息	接收命令 30H 时，回送信息 $N=1$ 接收命令 31H 时，回送信息 $N=31$

c) 外围接口地址

外围接口地址的约定见表 C.3。

表 C.3 外围接口地址的约定

接 口 地 址	内 容 含 义
读 0C200H 地址单元的 D0 位	0: 接收数据的 CRC 错误 1: 接收数据的 CRC 正确
读 0C200H 地址单元的 D7 位	0: 未发送完 1: 已发送完
写 0C200H 地址单元	将数据缓存区中的数据发送
读 0C300H 地址单元的 D7 位	0: 通信接口为接收状态 1: 通信接口非接收状态
写 0C300H 地址单元	设置通信接口为接收状态

C.2 步骤与实施

按照第 6 章的要求对 DY 系统中通信模块 INT0-ISR 进行 SFMECA，并填写表 C.4，其主要内容阐述如下：

- 故障模式确定，根据通信协议，可按接收数据功能和发送数据功能分别确定故障模式；
- 故障原因分析，故障原因分为总线通信控制器的原因、对方发送的原因和自身程序的原因；
- 故障影响分析，针对每个故障模式分析其对本模块直至整个 DY 系统造成的影响；
- 危害性分析，采用 RPN 方法进行该通信模块的危害性分析，参照表 19、表 20 和表 21 确定每个故障模式的严酷度等级 (SESR)、发生概率等级 (SOPR) 和被检测难度等级 (SDDR)。并按照公式 (5) 计算软件风险优先数 SRPN，从而确定每个软件故障模式的危害性等级的优先排序；
- 改进措施，根据以上故障模式、原因、影响及危害性的分析结果，综合考虑故障的影响及 SRPN 值等情况，对每个故障模式制定了相应的改进措施。

C.3 结论

由于该型号软件最初设计和实现中均未进行过软件 FMECA 工作，该软件曾频繁出现通信故障的现象。通过对该软件进行 FMECA，并依据软件风险优先数 SRPN 将故障模式分为 5 档 (SRPN=336 的 2 个、SRPN=224 的 3 个、SRPN=210 的 2 个、SRPN=175 的 2 个、SRPN=126 的 2 个)，对风险优先数高的故障模式优先进行修改 (详见表 C.4 中“改进措施”栏)。经设计人员依据“改进措施”进行修改后，新版软件再未发生通信故障，即使在通信时人为地施加干扰，仍能保证通信正常。实践表明，软件 FMECA 是提高软件可靠性和安全性的有效方法，它能够有效地发现软件中早期的设计缺陷和代码缺陷。

本案例的 SFMECA 报告等，略。

表 C.4 某型号软件通信模块的 SFMECA 表

初始约定层次: DY 系统
 约定层次: DYS
 分析人员: ×××× 批 准: ××××
 审核: ××××
 填表日期: ××××年××月××日

序号	单元	功能	故障模式	故障原因	故障影响			危害性分析				改进措施
					局部影响	高层次影响	最终影响	SESR	SOPR	SDDR	SRPN	
1		通信接口非接收状态	此模块之外的程序写 0C300H 地址单元不当	模块单元无法进入	无法产生 INTO 中断	通信功能丧失	8	7	4	224	初始化时写 0C300H 地址单元后, 读 0C300H 地址单元的 D7 位, 直到确认通信接口为接收状态。判别中加以计数限制, 以保证规定时间到时, 记录故障标志并报错	
2		中断允许处于禁止状态	此模块之外的程序使用 DINT 和 EINT 不当	模块单元无法进入	无法响应 INTO 中断	通信功能丧失	8	7	4	224	严格检查 DINT 和 EINT 的语句位置	
3		INTO 中断标志位屏蔽	此模块之外的程序对中断屏蔽寄存器 IMR 设置不当	模块单元无法进入	无法响应 INTO 中断	通信功能丧失	8	7	4	224	严格检查 IMR 设置的语句位置和标志位	
4		CRC 错误	线路错误	接收数据异常	接收数据错误	通信错误	7	5	6	210	首先读 0C200H 地址单元的 D0 位, 判别 CRC 是 否正确, 若 CRC 错误, 则放弃此帧	
5		接收站地址错误	总线通信控制器错误	非本站需要的接收数据	接收数据错误	通信错误	7	3	6	126	由总线通信控制器的设计可靠性保证	
6	INTO-ISR	发送站地址错误	总线通信控制器错误	非本站需要的接收数据	接收数据错误	通信错误	7	3	6	126	由总线通信控制器的设计可靠性保证	
7		命令非 30H 或 31H	发送方的错误命令	影响命令的正确执行	接收处理错误	通信错误	7	5	5	175	检查命令字是否合法, 如果非法, 则放弃此帧	
8		30H 时 N 不为 1, 或 31H 时 N 不为 45	发送方的错误信息	影响信息的正确使用	接收处理错误	通信错误	7	5	5	175	检查信息长度是否合法, 如果非法, 则放弃此帧, 并回送相应故障码	
9		尚未发送就强行设置接收状态	程序控制错误	影响发送数据的正确性	发送数据错误	通信错误	7	6	5	210	写 0C200H 地址单元后, 读 0C200H 地址单元的 D7 位, 直到判别为已发送完后, 再通过写 0C300H 地址单元设置通信接口为接收状态。注: 此措施与模式 10 和 11 相结合	
10		数据发送始终不成功	总线通信控制器错误	发送数据失败, 如果程序处理不当可能造成死循环	发送数据失败, 处理不当此单元可能无法退出	通信功能丧失, 处理不当可能死机	8	6	7	336	写 0C200H 地址单元后, 读 0C200H 地址单元的 D7 位, 判别是否已发送完, 并加以计数限制, 以保证规定时间到时, 记录故障标志并退出此模块	

表 C.4 (续)

序号	单元	功能	故障模式	故障原因	故障影响			危害性分析				改进措施
					局部影响	高一层次影响	最终影响	SES	SOPR	SDDR	SRPN	
11	INT0-ISR	数据发送	发送结束后通信始终无法设置为接收状态	总线通信控制器错误	无法接收数据, 如果程序处理不当造成死循环	通信模块无法再进入, 处理不当此单元可能无法退出	通信功能丧失, 处理不当可能死机	8	6	7	336	写 0C300H 地址单元后, 读 0C300H 地址单元的 D7 位, 判断是否已为接收状态, 并加以计数限制, 以保证规定时间到时, 记录故障标志并退出此模块

初始约定层次: DY 系统 分析人员: ××× 批准: ××× 第 1 页·共 2 页
 约定层次: DYS 审核: ××× 填表日期: ××××年××月××日

附录 D

(资料性附录)

工艺 FMECA 的应用案例

D.1 系统定义

某型导弹固体火箭发动机是该弹的主要舱段之一，组件“壳体组合”又是该部件的重要组成部分。“壳体组合”是由前端环(1)、壳体圆筒(2)、后端环(3)、固定片(4)和弹簧(5)等五个零件焊接而成(见图 D.1)，材料选用的是超高强度钢，其特点是热处理后强度和硬度高、加工比较困难。因热处理变形较小，可以在热处理前加工完所有尺寸；但热处理后会收缩，这就要求在热处理前加工各尺寸时，应考虑收缩量。

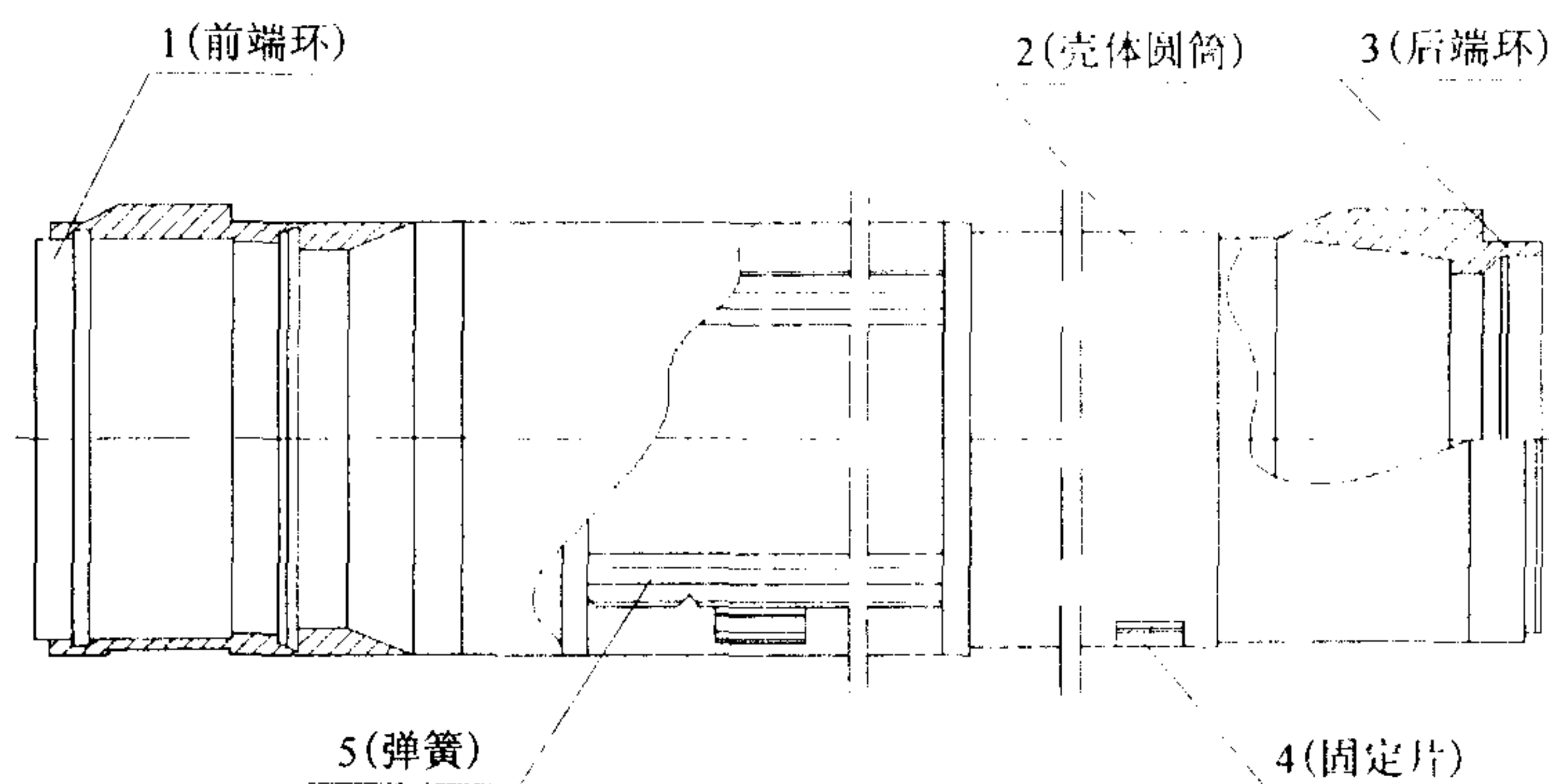


图 D.1 某型导弹固体火箭发动机“壳体组合”结构示意图

从图 D.1 知，壳体圆筒(2)属薄壁筒形零件，通过旋压成型，可能产生一定的圆度误差和挠度。这对保证弹体的圆度和全长跳动有一定难度。而且，由于薄壁零件在加工中容易变形，不利于满足尺寸精度、形状和位置公差的要求。以下选择组件“壳体组合”为例进行工艺 FMECA。

D.2 组件“壳体组合”的工艺 FMECA

D.2.1 分析对象生产工艺的功能与要求

建立“组件‘壳体组合’的工艺流程表”，见表 D.1，以确定该产品与工艺有关的流程功能和要求；依据工艺的流程特性建立“组件‘壳体组合’的零部件-工艺关系矩阵表”，见表 D.2，并选择其中部分工序进行分析。

表 D.1 组件“壳体组合”的工艺流程表(部分)

零部件名称：壳体组合	生产过程：壳体组合加工	审核：×××
零部件号：×××××	部门名称：××车间	批准：×××
装备名称：某型导弹	分析人员：×××	填表日期：×年×月×日
第 1 页·共 1 页		
工艺流程	输入	输出结果
工序 15(焊)：前、后端环与壳体组合焊接对接	焊接方式、焊接电流、焊接速度、送丝速度等	焊缝处机械性能、焊接错位量、焊缝余高、焊缝质量
工序 75(车)：加工前端内、外圆尺寸	机床转速、走刀速度、进给量	有关几何尺寸、形状和位置误差、表面粗糙度
工序 80(车)：加工零件总长及后端外圆及焊缝	机床转速、走刀速度、进给量	有关几何尺寸、形状和位置误差、表面粗糙度
工序 115(热处理)	加热温度、保温时间、冷却介质、装炉方式、炉内真空度	基体及焊缝处机械性能

表 D.2 组件“壳体组合”的零部件-工艺关系矩阵(部分)

零部件名称: 壳体组合		生产过程: 壳体组合加工		审核: ×××				
零部件号: ×××××		部门名称: ××车间		批准: ×××				
装备名称: 某型导弹		分析人员: ×××		填表日期: ×年×月×日		第 1 页·共 1 页		
零部件特性		工艺操作(部分)						
		15▲	70	75▲	80▲	85	90	115
总长		√			√			√
前端焊接错位量		√	√	√				
后端焊接错位量		√			√	√		√
前端	圆跳动 φ 0.05			√				√
	同轴度 φ 0.1			√				√
后端	同轴度 φ 0.05					√		√
	圆跳动 φ 0.005					√		√
	对称度 0.1						√	√
注 1: √表示某“工艺操作”涉及的“零部件特性”。								
注 2: ▲表示关键/重要工序。								

D.2.2 PFMECA 的实施

PFMECA 步骤的实施主要是按第 8 章要求填写工艺 FMECA 表, 见表 D.3, 并根据表 D.1、表 D.2 的结果, 经分析选择表 D.2 中工序列 15、75、80 为关键/重要工序进行 PFMECA。其主要步骤如下:

- 故障模式分析。根据表 D.1 中各项工序“工艺流程”的功能, 分析、归纳可能的故障模式。比如过程 75 工序的功能是“加工前端内、外圆尺寸”, 其故障模式有“尺寸 5.5 与 13 超差”、“内径 1 超差”、“加工焊缝余高时碰伤基体”和“内径 2 超差”, 见表 D.3 “故障模式”栏;
- 故障原因分析。例如, 造成工序 75 故障模式的原因是“加工失误”、“基准找不圆或未找圆”、“错位量大”和“时效后变形”等。见表 D.3 “故障模式原因”栏;
- 故障影响分析。分析每个故障模式对下一道工序、组件或导弹功能的“故障影响”, 见表 D.3 中的“故障影响”栏;
- 风险优先数(RPN)的分析。分析并确定每一个“故障模式严酷度等级(S)”、“故障模式发生概率(O)”、“故障模式被检测难度(D)”和“风险优先数(RPN)”, 见表 D.3 中的 S、O、D、RPN 栏;
- 改进措施。根据 RPN 制定预防或纠正故障模式的改进措施, 在表 D.3 中, 故障模式的 RPN 值为 216, 共 5 处。以此作为改进的主要目标, 并制定其相应的改进措施, 见表 D.3 中的“改进措施”栏;
- “改进措施执行情况”、“措施执行后的 RPN”大小。例如针对“75 工序(车)”加工前端内、外圆尺寸时的故障模式“内径 2 超差”采取了“增加本工序预留加工余量, 并在热处理后增加车工工序, 直至加工到最终尺寸”的改进措施, 经跟踪: RPN 值由 216 减小到 108, 即减少 50%, 这表明改进措施是有效的。针对其他故障模式的改进措施也是有效的, 见表 D.3。

D.2.3 结果分析及改进措施

a) 结果分析

RPN 值为 216 的(共 5 处)的故障模式可分为三类:

一类是直径超差(前端内径 2、后端外径 2), 其原因是圆筒是薄壁形零件, 容易因热处理及焊接发生变形;

二类是加工焊缝余量超高时碰伤基体, 其原因是焊接后存在错位量, 焊缝的高度不同; 焊缝处与加工基准不同轴, 旋转的车刀修余量超高时可能会碰伤基体;

三类是“错位量超差”，其原因是由于释放旋压产生的应力而引起“焊接时壳体圆筒产生变形”。

b) 改进措施

- 1) 在车工工序后增加钳工工序，采用手工锉修焊缝余高。在热处理前对前端内径和后端外径 2 不加工到最终尺寸，采取预留 0.5 毫米左右的加工余量的办法，并在热处理后增加车工工序加工到最终尺寸；
- 2) 在零件“壳体圆筒”的工艺中，即在壳体圆筒旋压后，增加热处理时效工序。

D.2.4 结果的评价

从表 D.3 得知，采取改进措施后，降低了工艺故障模式发生的概率等级(O)。将上述两项改进措施落实到工艺规程中，并在后三批产品加工中加以实施，取得很好的效果：

- a) “错位量超差”的不合格率由 60%降低到 2%左右；
- b) 人工锉修焊缝时，碰伤基体的情况大为减少；
- c) 前端内孔 2、后端外径 2 的偏差量大为减少。

本案例的工艺 FMECA 报告等，略。

表 D.3 “壳体组合”过程 PFMECA (部分)

产品名称(标识): 壳体组合
 生产过程: 壳体的组合加工
 所属装备/型号: 某型导弹
 分析人员: ×××
 审核: ×××
 批准: ×××
 填表日期: ××××年××月××日

第 1 页, 共 2 页

工艺名称	工序功能/要求	故障模式	故障原因	故障影响			改进前的 RPN			改进措施	改进措施执行情况	改进措施后的 RPN				
				下道工序影响	组件影响	装备影响	S	O	D			RPN	S	O	D	RPN
15 工序 (焊接)	前、后端与壳体组合对接	错位量超差	端环与壳体圆筒对接尺寸配合不好	影响包覆层的贴合	导弹解体	9	6	3	162	使用焊接定位夹具	执行有效					
			焊接时壳体圆筒产生变形	降低焊接部分强度	导弹解体	9	8	3	216▲	在壳体圆筒旋压后增加热处理工序	在壳体圆筒旋压后增加了热处理工序	7	5	3	105	
		焊缝有气孔、夹渣或黑线等缺陷	焊接工艺参数设置不当	无	无	无	4	3	3	81	调整加工参数	执行有效				
			焊接前清理不干净	无	无	无	4	3	3	108	清洗后检验	执行有效				
75 工序 (车)	加工前端内、外圆尺寸	尺寸 5.5 与 13 超差	加工失误	无	与其他舱段对接不紧	增加导弹总体装配难度	4	3	3	36	加工及时测量	执行有效				
			基准找不圆或未找圆	无	与其他舱段对接时, 楔铁无法打入或松动	增加导弹总体装配难度	4	6	3	72	规定将外圆找正在 0.05 以内再加工, 否则, 轻车外圆	执行有效				
		加工焊缝余高时碰伤基体	由于焊缝处与基准处不同轴以及错位量的原因, 一侧车低后另一侧仍高	影响壳体机械性能	导弹解体	9	8	3	216▲	增加焊缝余量的高度, 并增加钳工工序打磨焊缝	增加了钳工工序打磨焊缝	9	3	3	81	
			基准找不圆或未找圆	无	影响与前舱段装配	导弹解体	9	4	3	108	规定将外圆找正在 0.05 以内再加工, 或轻车外圆	执行有效				
内径 2 超差	时效后变形		时效后变形	无	影响与前舱段装配	导弹解体	9	8	3	216▲	增加本工序预留加工余量, 并在热处理后增加车工工序, 直至加工到最终尺寸	将本工序此尺寸预留 0.5 毫米左右余量, 在热处理后增加车工工序加工到最终尺寸	9	4	3	108

表 D.3 (续)

工艺名称	工序功能要求	故障模式	故障原因	故障影响			改进前的 RPN			改进措施	改进措施执行情况	改进措施执行后的 RPN				
				下道工序影响	组件影响	装备影响	S	O	D			RPN	S	O	D	RPN
80 工序 (车)	加工零件总长及后端外圆及焊缝	长度超差	焊接时, 焊缝的收缩量与预期值不符	增加加工难度	不利于组件装配	装药量减少或总长增加	7	5	3	105	预测收缩量, 加工及时测量	执行有效				
				增加加工难度	不利于卡子装配	增加导弹总体装配难度	4	6	3	72	加工及时测量	执行有效				
				增加加工难度	影响壳体机械性能	导弹解体	9	8	3	216▲	嘱咐加工者宁高勿低; 增加钳工工序打磨焊缝	增加了钳工工序打磨焊缝	9	3	3	81
115 工序 (热处理)	热处理后车到最后尺寸	外径 2 超差	热处理后变形	增加加工难度	影响后舱段装配	导弹解体	9	8	3	216▲	本工序留加工余量, 在热处理后增加车工工序, 并加工到最终尺寸	将本工序此尺寸留 0.5 毫米余量, 在热处理后增加车工工序并加工到最终尺寸	9	4	3	108

注: ▲表示关键工序的 RPN 值。

产品名称(标识): 壳体组合
所属装备/型号: 某型导弹

生产过程: 壳体的组合加工
分析人员: ×××

审核: ×××

批准: ×××

第 2 页 · 共 2 页

填表日期: ××××年××月××日

附录 E (资料性附录)

FMECA 在维修性分析中的应用及案例

E.1 概述

FMECA 是直接从产品出发考虑其故障模式、影响及危害性，而维修性分析则主要是从人-机交互的角度考虑产品具备好修、易修的特性。FMECA 给出的故障信息正是维修性及维修工作所要解决的问题。FMECA 与维修性分析工作有如下关系：

- a) 利用 FMECA 结果进一步针对故障的基本维修措施确定维修性的设计与分析要求；
- b) 利用 FMECA 技术，研究维修中由于人-机交互而引发“新”的故障模式，并进行相应的故障模式影响及危害性分析，从而为维修性设计分析中的维修安全、防差错措施、维修中入素工程要求等方面提供信息。

E.2 FMECA 在维修性分析中的应用步骤与实施

E.2.1 FMECA 在维修性分析中的应用步骤

FMECA 在维修性分析中的应用步骤见图 E.1。

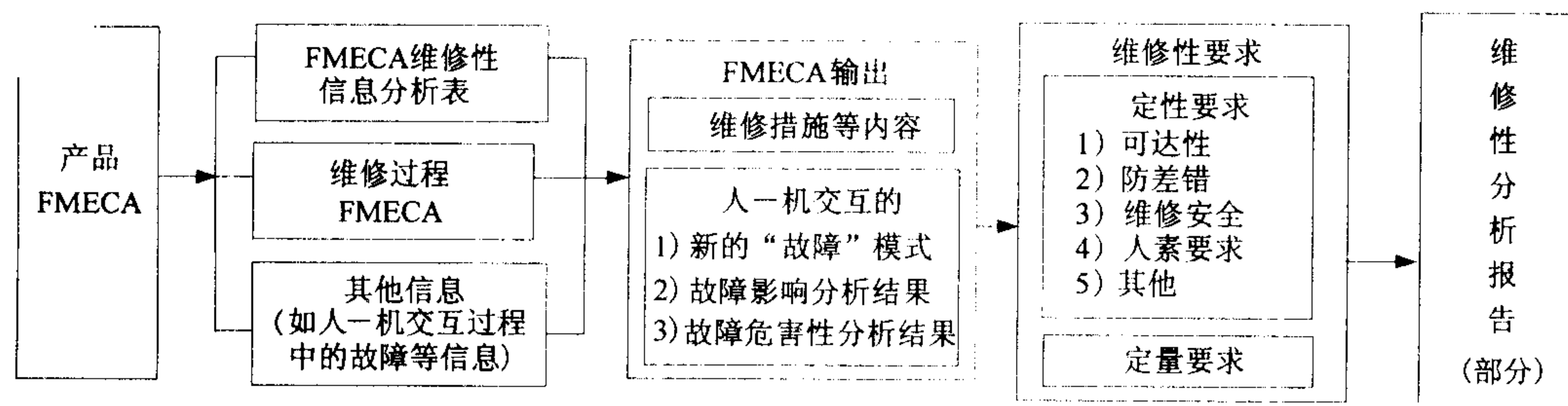


图 E.1 FMECA 在维修性分析中的应用步骤

由图 E.1 可知，将 FMECA 应用于维修性分析，首先是“产品 FMECA”工作。这部分工作包含了系统定义、确定任务剖面以及相应的产品功能描述、进行产品的功能及硬件 FMECA 等内容。

在完成产品 FMECA 工作之后，基于工程经验等方法，可填写“FMECA 维修性信息分析表”，见表 E.1。针对表 E.1 中的“基本维修措施”以及“最少设备清单”等内容，进一步开展维修性分析，明确维修性设计要求。

另外，将维修作业看作一种人-机交互过程，可以定义一类范围更广的“系统”。这种系统的定义中包含了维修人员在完成维修任务过程中由于人-机交互而可能引起的故障。此故障不一定是产品发生的故障，而可能是在维修过程中使产品执行了不应该执行的正常功能，这同样能够对维修人员和/或产品造成影响。这类系统可定义为“成功地完成维修作业”。很显然，此时的 FMECA 可视为一种过程 FMECA (针对维修过程)，如图 E.1 中“维修过程 FMECA”。

若需要开展维修性分析工作，其第一步应确定分析对象，如现场可更换单元(LRU)、车间可更换单元(SRU)等，第二步从 5.4 节所述的“功能及硬件 FMEA 表”(表 11)的输出中提取该对象的信息，进而再提取出对维修有影响的内容(例如有污染性或有毒气体、液体的泄漏等)；最后，对于出现的情况，可考虑在维修过程中有针对性地对此类会影响人身安全问题进行处理，或制定必要的防护措施，或修改产品设计，以改变其维修特性。这个过程正体现了 FMECA 工作在维修性分析中的应用。

在进行了 FMECA 之后，其中排除故障所需要的“基本维修措施”(见表 E.1)信息可用于确定维修性的定性、定量要求；在定义“人-机”系统的基础上分析获得新的故障模式、影响及危害性，并在维修性设计分析工作中加以解决。

E.2.2 FMECA 在维修性分析中的实施

主要包括：

- a) 填写表格。FMECA 在维修性分析中的实施是填写“FMECA 维修性信息分析表”，见表 E.1。

表 E.1 FMECA 维修性信息分析表

初始约定层次		任务		审核		第 页·共 页						
约定层次		分析人员		批准		填表日期						
代码	产品或功能标志	功能	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度类别	故障检测方法	基本维修措施	是否属于最少设备清单	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)

在表 E.1 中：

表头、第(1)栏“代码”、第(3)~第(10)栏的内容与“功能及硬件故障模式及影响分析(FMEA)表”(见表 11)中对应栏的内容相同。但第(2)栏的内容与表 11 有所区别，即在维修性分析应用中，分析的产品对象应定位于 LRU 与 SRU。

第(11)栏是针对第(10)栏“故障检测方法”，填写需要排除此故障模式所需“基本维修措施”或“维修工作”。但需注意，如果经 FMECA 分析并采取能够消除此故障模式的设计更改措施，则不应填入表中此栏。

第(12)栏填写分析对象“是否属于最少设备清单”。它可视为一种衡量产品重要程度的手段。利用此信息，可以用于维修性设计方案(例如设备的结构、安装要求)的权衡分析。

依据表 E.1 的信息，针对维修性设计要求的各项内容开展分析工作，即针对“基本维修措施”的实施过程，进一步考虑维修性的定性、定量要求。例如“基本维修措施”中指明更换某设备，在设备拆卸时，应根据其结构安装特性提出具体的可达性、人素要求等。

- b) 开展维修过程 FMECA。应根据具体产品的需要，可以针对比较重要的、对维修性影响较大的故障模式决定是否开展维修过程的 FMECA 工作。

E.3 案例——某型导弹地面测试设备 FMECA 在维修性分析中的应用

某型导弹地面检测设备 FMECA 在维修性分析中的应用见表 E.2。有关系统定义、功能原理说明或功能框图、任务可靠性框图等文字说明，略，且表 E.2 仅是部分摘要。

表 E.2 某型导弹地面测试设备 FMECA 维修性信息分析表

初始约定层次：某型导弹系统 任务：地面检测导弹 审核：××× 第 1 页·共 1 页
 约定层次：地面测试设备 分析人员：××× 批准：××× 填表日期：××-××-××

代码	产品或功能标志	功能	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度类别	故障检测方法	基本维修措施	是否属于最少设备清单	备注
					局部影响	高一层次影响	最终影响					
××	电源控制柜	提供测试导弹时测控机箱及相关设备	供电模块输出不正常	电缆插接不正常，导致电源线路发生短路、断路	测试设备工作不正常	导弹测试无法进行	延误影响导弹的使用	III	自检	视情重新插拔电缆或更换电缆	—	
			面板误操作	在仪器柜的最下方，操作者脚容易碰到	测试设备工作不正常	影响导弹测试	延误影响导弹系统的使用	III	操作人员检查监控	中断测试设备工作，重新启动系统	—	

根据表 E.2 的分析结果，可根据测试设备的研制情况研究改进电缆插接方式、改进面板上控制开关的布置等方法，提出具体的维修性设计要求，进而有助于实现改进产品维修性水平的目的。

附录 F
(资料性附录)

FMECA 在安全性分析中的应用及案例

F.1 概述

利用 FMECA 方法, 识别安全性分析中所有可能的故障模式、发现故障危险源、分析可能产生安全性影响、确定危险的严重性和可能性(即风险), 消除或控制有危险故障的安全性关键产品, 制定有效改进措施, 以提高产品的安全性水平。

FMECA 在安全性分析中的应用是 FMECA 应用的扩充。一般在关键产品上应用, 以减少分析工作量。危险的严重性等级、风险指数、风险水平分类分别见表 F.1、表 F.2、表 F.3。

表 F.1 危险的严重性等级定义

等 级	定 义
I (灾难的)	人员死亡或系统报废
II (严重的)	人员严重受伤、严重职业病或系统损坏
III (中等的)	人员中等受伤、轻度职业病或系统中等损坏
IV (轻微的)	轻于III级的损伤

表 F.2 风险指数定义

故障模式发生可能性等级	严重性等级*			
	I (灾难的)	II (严重的)	III (中等的)	IV (轻微的)
A(频繁)	1	3	7	13
B(很可能)	2	5	9	16
C(有时)	4	6	11	18
D(极少)	8	10	14	19
E(不可能)	12	15	17	20

注: 表中阴影部分表示分析中要特别关注, 其表中序号越小显示风险越大。

表 F.3 风险水平分类

风险评价指数	风险水平	评价准则
1-5	高	不可接受
6-9	严重	不希望(一般不接受)
10-17	中	可接受(但需经评审)
18-20	低	可接受

F.2 FMECA 在安全性分析中的应用步骤与实施

F.2.1 FMECA 在安全性分析中的应用步骤

FMECA 在安全性分析中的应用步骤见图 F.1。

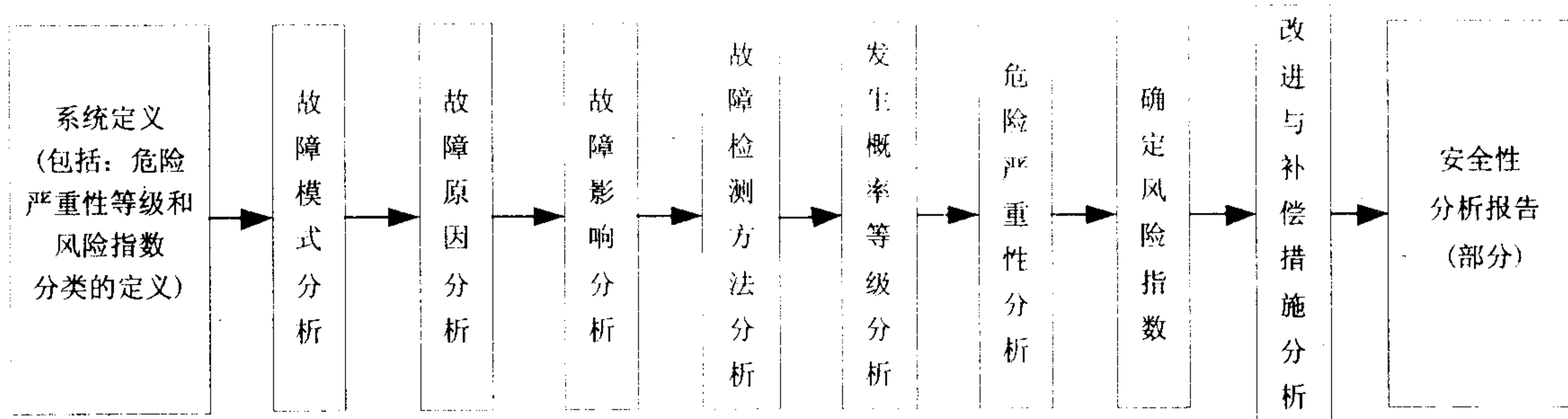


图 F.1 FMECA 在安全性分析中的应用步骤

F.2.2 FMECA 在安全性分析中的应用实施

FMECA 在安全性分析中应用的实施主要是填写表格, 并提出有效的改进措施和使用补偿措施, 见表 F.4。根据实际情况, 表 F.4 中的内容可以增、删。

表 F.4 安全性分析的 FMECA 表

初始约定层次		任务		审核		第 页 · 共 页										
约定层次		分析人员		批准		填表日期										
代码	产品标识		功能	故障模式	故障原因	故障影响			检测方式	故障模式发生可能性等级	是否单点故障	危险的严重性等级	风险指数	设计改进措施	使用补偿措施	备注
	产品名称	部件标识号				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)	(14)	(15)	(16)	(17)

表中, 除了以下内容, 其他各栏与“功能及硬件 FMEA 表”(表 11)对应栏内的内涵和填写方法相同。

- 栏(9): 需要补充最终的安全性后果, 尤其应把人员安全的影响考虑进去;
- 栏(13): 根据第(9)、(12)栏的内容, 参照表 F.1 的定义判断所存在“危险的严重性等级”;
- 栏(14): 根据第(11)、(13)栏的内容, 参照表 F.2 的定义判断“风险指数”;
- 栏(15)、(16): 主要考虑消除、控制故障模式危险的设计改进和使用补偿措施。

F.3 案例——某型航天器推进系统 FMECA 在安全性分析中的应用

某型航天器推进系统 FMECA 在安全性分析中的应用详见表 F.5。有关系统定义、危险严重性等级定义的文字说明, 以及 FMECA 在安全性中的应用报告等, 略, 且表 F.5 仅是部分摘要。

表 F.5 安全性分析的 FMECA 表(部分)

初始约定层次: 航天器		任务: 返回救生段		审核: ××		第 页 · 共 页					
约定层次: 返回舱推进系统		分析人员: ××		批准: ××		填表日期: ××××年×月×日					
代码	产品标识	故障模式	故障原因	故障最终影响	检测方式	故障模式发生可能性等级	危险的严重性等级	风险指数	设计改进措施	使用补偿措施	备注
1	火工品	误点火	静电, 电磁干扰; 局部热环境等	电爆阀提前工作, 贮箱提前增压, 加重航天员心理负担	遥测	D	III	14	选用特定条件下点火的钝感火工品	防静电、电磁干扰, 改善火工品局部热环境	设计评审、验证
2		不点火	未装点火药; 控制电路未接通	电爆阀打不开, 发动机不工作, 无控制力, 伤害航天员	遥测, 机内检测	E	I	12	提高控制电路可靠性	加强火工品出厂验收, 100%射线检验	产品质量评审; 产品 100%射线检验
3	减压阀	内漏	多余物卡住; 设计缺陷	贮箱增压过压, 爆炸, 危害航天员	无	E	I	12	阀前加过滤器; 改进密封设计; 装安全阀	加强多余物检查, 密封性试验验证	设计评审、验证; 密封性试验验证

表 F.5(续)

初始约定层次: 航天器

任务: 返回救生段

审核: ××

第 页·共 页

约定层次: 返回舱推进系统

分析人员: ××

批准: ××

填表日期: ××××年×月×日

代码	产品标识	故障模式	故障原因	故障最终影响	检测方式	故障模式发生可能性等级	危险的严重性等级	风险指数	设计改进措施	使用补偿措施	备注
4	推力室	无推力	液路阻塞; 阀打不开; 推力室催化剂失效	返回舱无控制力, 伤害航天员	无	D	I	8	冗余; 加过滤器; 提高催化剂能力与寿命; 提高控制电路可靠性	加强检查	设计评审、验证; 可靠性预计值和试验评估应符合要求
注: 为突出产品的风险分析, 本例仅分析了故障模式的“最终影响”。											

附录 G

(资料性附录)

FMECA 在测试性分析中的应用及案例

G.1 概述

FMECA 是测试性分析的重要基础之一。FMECA 的结果，尤其是获得的故障模式等内容，为产品的测试性指标分配、测试性预计、故障注入或模拟、优选测试点，以及具体操作等方面提供支持。

G.2 FMECA 在测试性分析中的应用步骤与实施

G.2.1 FMECA 在测试性分析中的应用步骤

FMECA 在测试性分析中的应用步骤见图 G.1。

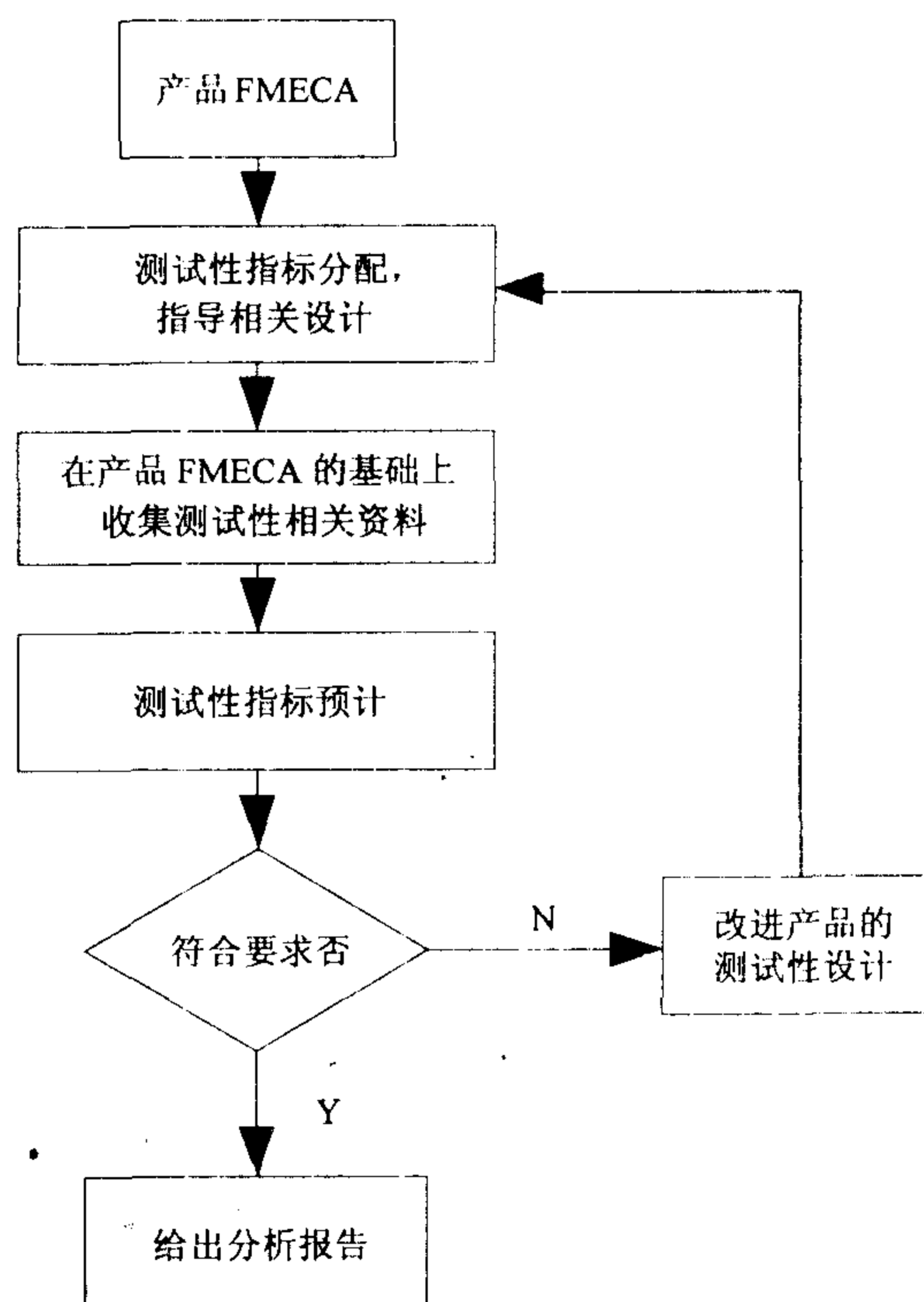


图 G.1 FMECA 在测试性分析中的应用步骤

图 G.1 中：

- 产品 FMECA 过程详见本标准正文“5 功能及硬件 FMECA”；
- 在 FMECA 中获得的故障模式、影响和故障率数据等信息的基础上，进行测试性指标的分配，指导测试点的选取、固有测试性和机内测试(BIT)的设计；
- 收集包括故障检测能力和故障隔离能力等内容的测试性相关资料；
- 根据 c) 中收集的资料，进行测试性指标预计，并判断是否符合规定的测试性要求；
- 当预计值不符合要求时，要对系统的测试性设计进行改进，再针对改进的系统进行测试性资料收集及指标预计，如此反复迭代，直至符合要求；
- 当预计值符合要求时，将 FMECA 和测试性相关分析的结果写成分析报告。

G.2.2 FMECA 在测试性分析中的实施

FMECA 在测试性分析中的实施主要是填写表 G.1。根据实际情况，表 G.1 中的内容可以增、删。

表 G.1 测试性分析的 FMECA 表

初始约定层次		任务		审核		第 页·共 页																
约定层次		分析人员		批准		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	故障模式概率等级或故障率数据源	故障率 λ_p	故障模式频数比 α_j	故障影响概率 β_j	检测能力 λ_D				隔离能力 λ_I			BIT 硬件故障率	备注			
											BIT 及其相关信息				ATE	人工	UD			LRU		
											IBIT	MBIT	PBIT	虚警率 λ_{FA}						ISRU	...	nSRU
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)		
总计																						

表 G.1 中第(1)~第(11)栏的内容与“危害性分析表”(表 16)中对应栏的内容相同,并将表 16 中对应栏的内容直接填入表 G.1 中。

第(12)~(18)栏中主要填写各种检测方法可检测的故障模式的故障率。其中“BIT”为机内测试,“ATE”为自动测试设备,“人工”为人工测试,“UD”为不能检测。“BIT 及其相关信息”主要包括:IBIT 栏为系统运行前 BIT 可检测的故障率;MBIT 栏为运行后维修 BIT 可检测的故障率;PBIT 栏为系统运行中 BIT 可检测的故障率;虚警率(λ_{FA})栏为可导致虚警事件的频率,也包括 BITE 故障会导致虚警发生的频率。

第(19)栏中主要填写隔离到不同级别的故障模式的故障率。其中 LRU 为现场可更换单元,即可在工作现场(基层级)从系统或设备上拆卸并更换的单元;SRU 为车间可更换单元,即可在车间(中继级)内,从 LRU 上拆卸并更换的单元。

第(20)栏中“BIT 硬件故障率”是用于该系统的自身 BIT 电路所用元器件的故障率。

第(21)栏中记录对其他栏的注释和补充说明。

G.3 案例——某型导弹飞控组件中二次电源分组件 FMECA 在测试性分析中的应用

有关系统定义、约定层次、方框图、严酷度定义,以及 FMECA 在测试性分析中的应用报告等,略。填表结果见表 G.2。

表 G.2 测试性分析的 FMECA 表

初始约定层次: 某型导弹

任 务: 供电

审核: ×××

第 1 页·共 1 页

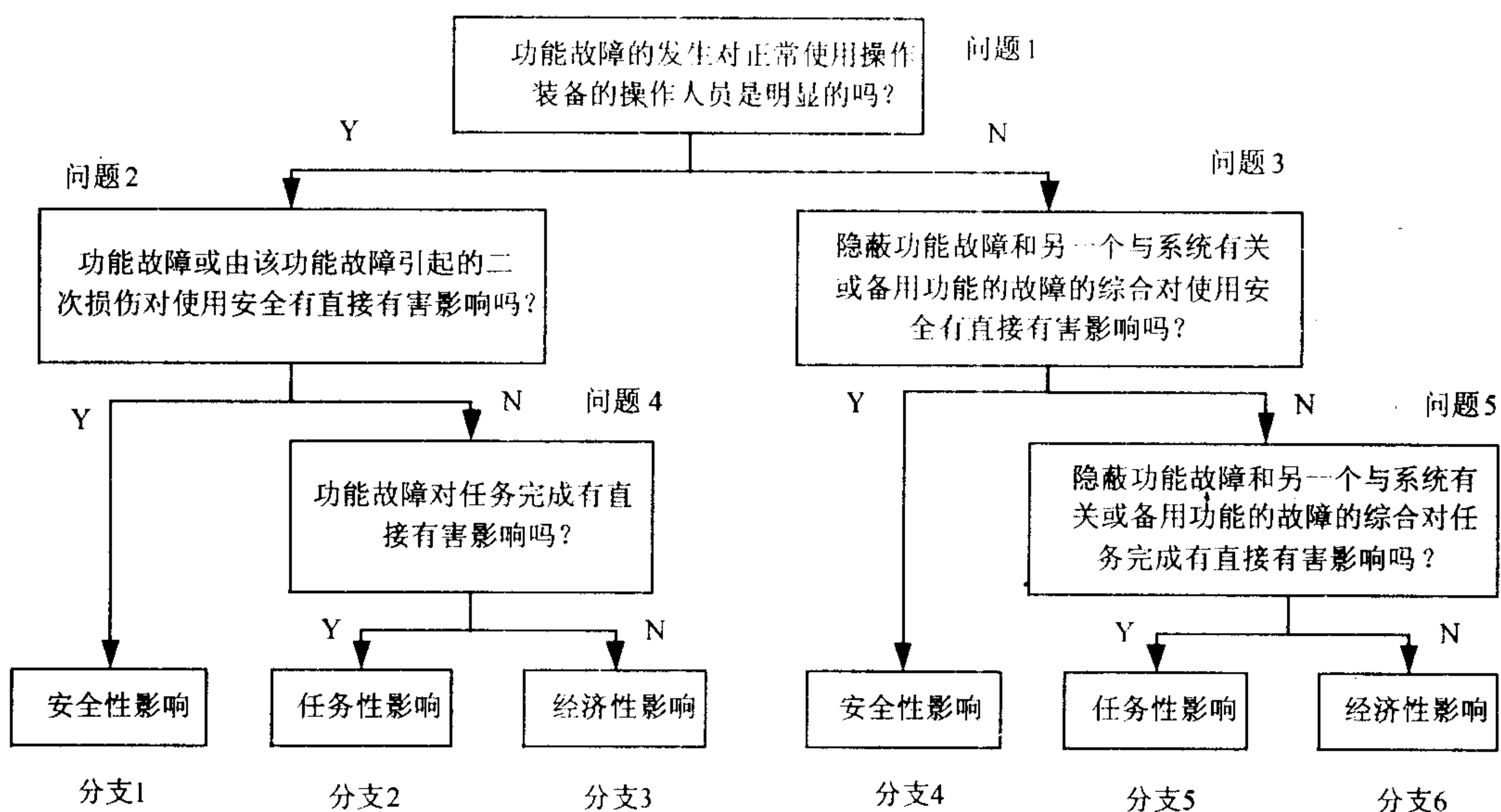
约定层次: 二次电源

分析人员: ×××

批准: ×××

填表日期: ××××年××月××日

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	故障模式概率等级或故障率数据源	故障率 λ_p	故障模式频数比 α_j	故障影响概率 β_j	检测能力 $\lambda_D (10^{-6}/h)$					隔离能力 $\lambda_I (10^{-6}/h)$			BIT 硬件故障率	备注		
											BIT 及其相关信息				ATE	人工	UD	ILRU				
											IBIT	MBIT	PBIT	虚警率 (λ_{FA})				1SRU			2SRU	3SRU
1	滤波器	电源干扰滤波	短路	振动温度		II	3.042	20%	1				0.6084			0.6084						
			退化			III		80%	0.1				2.4336									
2	电容器	电源去耦滤波	开路			III	0.029	16%	1				0.02117			0.02117						
			短路			II		73%	1													
3	电阻器	参数调整	开路			IV	0.139	92%	1							0.12788						
			参漂			IV		8%	0.5						0.00319							
4	电源模块	给导弹提供所需的各种电源	退化	机械温度		II	10.516	35%	0.1	3.6808				3.6808			3.6808					
			低温不启动			II		10%	0.1	1.0516				1.0516			1.0516					
			漏气			III		15%	0.1					1.5774					10.516			
			开路			II		15%	1	1.5774				1.5774				1.5774				
			短路			II		25%	1	2.629				2.629				2.629				
5	电连接器	电气连接	接触不良	使用工艺		II	0.366	80%	0.8				0.2928			0.2928						
			开路			II		20%	1						0.0732							
总计								14.092			8.9388			9.86117	4.23103	9.86117		10.516				



注：分支 1~分支 6 下的决断内容详见 GJB 1378 《装备预防性维修大纲的制定要求与方法》

图 H.2 RCMA 逻辑决断图

表 H.2 使用与维修工作分析(O&MTA)表

项目名称	件号	工作频数	分析人员	批准	第 页·共 页								
维修工作任务	工作任务编号	维修级别	审核	填表日期									
维修作业 工序号	工序 名称	维修时间 (人时)	操作人员		总工时 (人时)	日历时间	维修设备		备件及消耗品			技术文件	
			数量	等级			名称	编号	名称	件号	数量	名称	编号

注：工作频数是指每年进行该项维修工作的次数。

H.3 案例——某型火炮反后座装置的复进机内筒 FMECA 在保障性分析的应用

某型火炮反后座装置是由复进机和驻退机组成，其中复进机又包含外筒、中筒、内筒、紧塞器和开闭器。本例仅阐述对复进机内筒进行保障性分析时是如何应用 FMECA 技术的。有关系统定义、约定层次、绘制功能及任务可靠性框图、严酷度定义等，略。根据 H.2.2 节中 a)、b)、c) 要求分别填表，其结果见表 H.3~表 H.5。通过填写 FMEA 表、RCMA 表、O&MTA 表等工作，对复进机内筒的故障模式、原因、影响、故障检测方法、严酷度类别、维修时间、检查内容与周期，以及进行维修保障所需的保障资源等进行分析，并相应得出结论，为某型火炮反后座装置的保障性分析提供了支持。

附录 I

(资料性附录)

损坏模式及影响分析(DMEA)的应用案例

I.1 系统说明

某型军用飞机燃油系统是由机身油箱、机翼油箱、副油箱(由机身副油箱、机翼左右副油箱及其附件所组成)。其中,机身油箱又分为前部油箱、后部油箱。

该系统还具有空中加油、地面加油的功能。它在飞机整个任务阶段均处于工作状态。

I.2 填写 DMEA 表

按表 23 的内容,结合本案例(仅分析机身前部、后部油箱)的实际情况,其结果如表 I.1 所示。

I.3 结论

通过表 I.1 的特点分析,其结论如下:

- FMEA 是 DMEA 的基础, DMEA 是 FMEA 的扩展。先进行 FMEA, 确定重要部件后, 并对其进行 DMEA;
- FMEA 是从产品功能角度出发, 而 DMEA 是从提高武器装备的生存力和防易损性角度出发;
- 对武器装备的整个任务阶段均应考虑 DMEA。FMEA 不能代替 DMEA 的工作;
- 严酷度与损坏模式最终影响是不相同的;
- 损坏模式来源于威胁机理, 威胁机理主要来源于敌方攻击能力、我方作战任务和环境因素等。一般根据分析, 预测, 以往发生过的情况和经验等方面综合确定损坏模式;
- DMEA 的改进措施主要是针对损坏模式的影响而言。

DMEA 报告等, 略。

DMEA 主要是用于武器装备, 对民用产品一般不予采用。

表 I.1 某型飞机燃油系统 DMEA 表(部分)

初始约定层次: 某型飞机 任务: 飞行 审核: ××× 第 1 页·共 1 页
约定层次: 燃油系统 分析人员: ××× 批准: ××× 填表日期 ××××年××月××日

代码	产品或功能标志	功能	任务阶段与工作方式	损坏模式	损坏影响			改进措施	备注
					局部影响	高一层次影响	最终影响		
460021	机身前部油箱	提供燃油	飞行	油箱壁穿孔	油箱丧失功能	燃油损失, 燃油流入附近的无油隔舱	燃油不足, 内部起火	用预制补片胶接	
				油箱壁撞破	油箱丧失功能	燃油损失, 吸入燃油	燃油不足, 发动机毁坏	用预制补片胶接	
				外部起火	油箱爆炸	无油隔舱起火	内部起火	改进设计	
				油箱内起火	油箱爆炸	油箱起火	内部起火	改进设计	
				油箱内爆炸	油箱毁坏	油箱破裂燃油损失	内部起火 燃油不足	改进设计	
460022	机身 后部油箱	提供 燃油	飞行	油箱壁穿孔	油箱丧失功能	燃油损失	内部起火	用预制补片胶接	

中 华 人 民 共 和 国
国 家 军 用 标 准
故 障 模 式、影 响 及 危 害 性 分 析 指 南
GJB/Z 1391—2006

*

总装备部军标出版发行部出版
(北京东外京顺路7号)
总装备部军标出版发行部印刷车间印刷
总装备部军标出版发行部发行
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 4¼ 字数 137 千字
2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷
印数 1—1000

*

军标出字第 6626 号 定价 43.00 元

