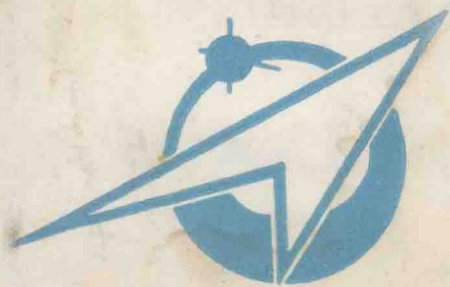


可靠性工程教材之(四)

4



# 失效模式影响 及其后果分析

中国航空学会 科普与教育工作委员会

**责任编辑：胡金城**

**技术校对：杨守纲**

**封面设计：陈肇和**

可靠性工程教材之(四)

**失效模式影响及其后果分析**

(书号：104)

---

**编辑：《航空兵器》编辑部**

(址地：河南洛阳Q30信箱13分箱)

**印刷：国营五三一印刷厂**

(址地：河南济源)

---

**(内部交流)**

## 说 明

为了满足广大读者学习可靠性工程的需要，我们组织编写了这套可靠性工程教材，内容包括《可靠性的数学基础》、《系统可靠性分析与设计》、《系统可靠性数字仿真》、《失效模式影响及其后果分析》、《可靠性数据处理与寿命评估》、《环境工程概论》和《可靠性工程专题选编》等七册。

这套教材在编写过程中，力求作到内容由浅入深、讲述详细、文字通俗，并侧重于实际应用。书中安排有较多的实例和习题，还附有计算机程序、各种图表和有关标准。因此，这套教材可供开设可靠性工程有关课程使用，也可供从事可靠性工程的技术人员和大专院校师生参考，并适合于自学。

这套教材由北京航空学院第一研究所负责编写，并得到航空工业部三〇一研究所的帮助。在编辑出版过程中还得到航空工业部六一二研究所的大力支持和帮助，在此一并致谢。

**中国航空学会科普与教育工作委员会**

一九八四年四月

# 前 言

失效模式及影响(效应)分析是产品的可靠性分析与评估的方法之一,亦是产品整个寿命期内必不可少的技术之一。在工业发达的国家里,失效模式及影响分析的方法广泛应用于宇航、核工业、电子设备、机械以及民品等领域内,并在工程实践中总结了一套科学而完整的分析方法。国际电工委员会制定了失效模式及影响分析的标准程序。美国军标(如MIL-STD-1543, MIL-STD-785)规定,“合同承包商应提供详细的失效模式和影响分析,这个分析工作应与设计工作一起安排和完成”,并要求“把失效模式和影响分析作为一项指导设计和为每个设计审查提供资料的连续工作来安排”。在美国有许多企业对此还作了明确规定,比如Grumman公司规定,“在飞行器研制过程的各个阶段,比如,在构思和初步设计之后,要进行各种失效模式的分析;在生产设计之后,则要进行有关元部件、系统和飞行器本身的失效模式分析”。又如Honeywell公司的航空航天部和质量保证部所属的试验分析研究室,就是以追查失效机理为宗旨的部门,它担负以下几项工作:1. 查明失效模式;2. 追查失效机理;3. 探讨改进方法。在某些数据处理中心亦包含失效分析工作,比如欧洲电子元件验证试验数据国际交换网(EXACT)的数据交换中,包含了交换失效分析的数据部分,在该机构的失效分析报告表中,要求记载如下内容:试验条件、失效模式,失效机理、样品的数量和照片等。上述实例说明,工业发达国家对产品的失效模式及影响分析问题是十分重视的。

在我国,由于可靠性研究工作逐渐得到重视和发展,对产品失效模式及影响分析技术亦逐步被重视起来。比如电子工业部部

标(SJ-2166-82)中规定,在产品可靠性计划的全部活动中对失效模式及影响分析都应有所要求。目前,我国已制定了失效模式影响分析(FMEA)的国家标准(草案)。为推动我国可靠性工作的开展,我们编写了这本“失效模式影响及其后果分析”教材。

本教材是在为航空工业部举办的“可靠性设计研究班”所编写的“故障模式影响及其致命性分析”讲义的基础上,经过三期研究班的实践后补充、修改而成的。

本教材共分四章。第1章概述,阐述失效分析的重要性、失效模式影响分析的一些基本概念;第2章介绍失效模式影响及其后果分析(FMECA)的基本步骤及其应用;第3章介绍FMECA与FTA(失效树分析)的综合分析法及其应用;第4章介绍FTA与ETA(事件树分析)的综合分析及其应用。为了紧密联系实际,每一章都列举了大量的实例,并提供了计算用的表格数据,以供读者查阅。

本教材在编写过程中,得到清华大学梅启智同志、北京广播器材厂尤巩圻同志、北航郑光华、杨为民、屠庆慈等同志的大力支持和帮助。成文后,又承蒙屠庆慈、杨为民同志进行全面的校审。在此,一并深表谢意。另外对本教材所引用的参考文献的作者,以及为出版本教材而付出辛勤劳动的同志深表谢意。

由于本人水平有限,教材中定有缺点和错误,敬请读者批评指正。

# 目 录

前 言	( 1 )
<b>第 1 章 概 述</b> .....	( 3 )
§ 1.1 问题的提出 .....	( 3 )
§ 1.2 失效分析中的一些基本概念 .....	( 6 )
1.2.1 失效(故障) .....	( 6 )
1.2.2 失效模式 .....	( 12 )
1.2.3 失效机理 .....	( 20 )
§ 1.3 失效分析的目的、任务及其常用的方法 .....	( 24 )
1.3.1 失效分析的目的、任务 .....	( 24 )
1.3.2 失效分析的常用方法 .....	( 27 )
§ 1.4 按失效原因分类的常用方法 .....	( 28 )
1.4.1 直方图 .....	( 28 )
1.4.2 因果图法 .....	( 30 )
1.4.3 主次图法 .....	( 32 )
<b>第 2 章 FMECA 及其应用</b> .....	( 35 )
§ 2.1 失效模式影响分析(FMEA)的概述 .....	( 35 )
2.1.1 FMEA 法的发展及其重要性 .....	( 35 )
2.1.2 FMECA 的基本概念 .....	( 36 )
2.1.3 FMEA 和 FMECA 的任务和所需要的 原始资料 .....	( 38 )
§ 2.2 FMEA 和 FMECA 的基本步骤 .....	
2.2.1 定义系统及其功能要求, 绘制功能 逻辑图 .....	( 41 )
2.2.2 构造系统的可靠性框图 .....	( 51 )

2.2.3	列出各功能级的失效模式、原因、效应	( 58 )
2.2.4	研究失效的检测方法	( 60 )
2.2.5	可能的预防措施	( 63 )
2.2.6	致命性(或后果)分析	( 64 )
2.2.7	填写FMEA(或FMECA)的表格	( 71 )
§ 2.3	FMEA与FMECA的三个案例	( 72 )
2.3.1	案例一: 雷达接收机前置放大器 失效后果分析	( 72 )
2.3.2	案例二: 电视发射设备分米波上 变频分系统的FMEA	( 76 )
2.3.3	案例三: 某个军用设备的FMECA	( 93 )
§ 2.4	对FMEA与FMECA的评价	( 96 )
§ 2.5	FMEA的矩阵分析法	( 97 )
2.5.1	发展概况	( 97 )
2.5.2	矩阵分析法的步骤及示例	( 97 )
2.5.3	对矩阵分析法的初步评价	( 101 )
<b>第 3 章</b>	<b>FMEA与FTA的综合分析法</b>	( 103 )
§ 3.1	概述	( 103 )
§ 3.2	案例分析	( 106 )
3.2.1	案例 1: 电视发射系统的上变频分 系统的综合分析	( 106 )
3.2.2	案例 2: 三哩岛事故原因的分析	( 117 )
3.2.3	案例 3: 某战斗机严重飞行事故的分析	( 123 )
<b>第 4 章</b>	<b>FTA与ETA的综合分析法</b>	( 140 )
§ 4.1	基本概念	( 140 )
§ 4.2	事件树分析(ETA)及其举例	( 141 )
4.2.1	ETA的基本步骤	( 141 )
4.2.2	ETA的实例——三哩岛事故分析	( 142 )
§ 4.3	FTA与ETA综合分析法的基本	

步骤及其应用 .....	( 147 )
4.3.1 综合分析法的基本步骤 .....	( 147 )
4.3.2 FTA与ETA综合分析法的实例—— 电机过热事故的分析 .....	( 148 )
<b>附录 1</b> 电子产品(半导体、固定电阻器、固定电容器) 失效机理与相对频率 .....	( 155 )
<b>附录 2</b> 分贝(dB)的意义 .....	( 161 )
<b>参考文献</b> .....	( 164 )



# 前 言

失效模式及影响(效应)分析是产品的可靠性分析与评估的方法之一,亦是产品整个寿命期内必不可少的技术之一。在工业发达的国家里,失效模式及影响分析的方法广泛应用于宇航、核工业、电子设备、机械以及民品等领域内,并在工程实践中总结了一套科学而完整的分析方法。国际电工委员会制定了失效模式及影响分析的标准程序。美国军标(如MIL-STD-1543, MIL-STD-785)规定,“合同承包商应提供详细的失效模式和影响分析,这个分析工作应与设计工作一起安排和完成”,并要求“把失效模式和影响分析作为一项指导设计和为每个设计审查提供资料的连续工作来安排”。在美国有许多企业对此还作了明确规定,比如Grumman公司规定,“在飞行器研制过程的各个阶段,比如,在构思和初步设计之后,要进行各种失效模式的分析;在生产设计之后,则要进行有关元部件、系统和飞行器本身的失效模式分析”。又如Honeywell公司的航空航天部和质量保证部所属的试验分析研究室,就是以追查失效机理为宗旨的部门,它担负以下几项工作:1. 查明失效模式;2. 追查失效机理;3. 探讨改进方法。在某些数据处理中心亦包含失效分析工作,比如欧洲电子元件验证试验数据国际交换网(EXACT)的数据交换中,包含了交换失效分析的数据部分,在该机构的失效分析报告表中,要求记载如下内容:试验条件、失效模式,失效机理、样品的数量和照片等。上述实例说明,工业发达国家对产品的失效模式及影响分析问题是十分重视的。

在我国,由于可靠性研究工作逐渐得到重视和发展,对产品失效模式及影响分析技术亦逐步被重视起来。比如电子工业部部

标(SJ-2166-82)中规定,在产品可靠性计划的全部活动中对失效模式及影响分析都应有所要求。目前,我国已制定了失效模式影响分析(FMEA)的国家标准(草案)。为推动我国可靠性工作的开展,我们编写了这本“失效模式影响及其后果分析”教材。

本教材是在为航空工业部举办的“可靠性设计研究班”所编写的“故障模式影响及其致命性分析”讲义的基础上,经过三期研究班的实践后补充、修改而成的。

本教材共分四章。第1章概述,阐述失效分析的重要性、失效模式影响分析的一些基本概念;第2章介绍失效模式影响及其后果分析(FMECA)的基本步骤及其应用;第3章介绍FMECA与FTA(失效树分析)的综合分析法及其应用;第4章介绍FTA与ETA(事件树分析)的综合分析及其应用。为了紧密联系实际,每一章都列举了大量的实例,并提供了计算用的表格数据,以供读者查阅。

本教材在编写过程中,得到清华大学梅启智同志、北京广播器材厂尤巩圻同志、北航郑光华、杨为民、屠庆慈等同志的大力支持和帮助。成文后,又承蒙屠庆慈、杨为民同志进行全面的校审。在此,一并深表谢意。另外对本教材所引用的参考文献的作者,以及为出版本教材而付出辛勤劳动的同志深表谢意。

由于本人水平有限,教材中定有缺点和错误,敬请读者批评指正。

# 第 1 章 概 述

## §1.1 问题的提出

随着科学技术的迅速发展,产品的结构日益复杂,使用环境更加严酷,因而对产品的可靠性要求越来越高。在实际使用中,由于设计、工艺、使用等因素所引起的产品失效(故障)不断发生,造成人力、时间和经济上的严重损失,进而影响部队的战斗力。

现从大量事故的发生,即从客观的要求上看失效分析技术的重要性,据统计:

1. 美国空军在二次世界大战期间由于飞行事故而损失的飞机达21,000架,比被击落的飞机多1.5倍。在侵朝战争中,美国空军又因飞行事故而损失飞机460架,死亡的飞行人员180人。西德空军仅F-104飞机,从1961年至1971年4月近10年间因事故就损失135架,死亡飞行人员65人,当时给西德的飞行人员造成十分恐惧的心理,把F-104飞机称作“活棺材”。

2. 从美国陆军1977至1982财年期间所发生的飞行事故的情况(见表1.1)来看:

(1) A级事故(系指损失在50万美元以上的事故)率最高达到59%;

(2) 飞行事故的万时率五年平均为0.298,而1982年达到0.371(目前世界常以飞行万时率来衡量飞机的可靠性水平,一般万时率 $\leq 0.3$ 就算先进水平);

(3) 事故损失在1982年竟达5,610万美元。

**表 1.1 美军国陆 1977—1982 财年期间飞行事故情况表**

项 目	数 据 财 年					
	1977	1978	1979	1980	1981	1982
A级事故次数的故障率 %	48	47	39	37	43	59
次/10万飞行小时	3.20	3.24	2.70	2.41	2.63	3.71
死亡人数	26	58	18	26	29	86
总飞行时间(万小时)	150	140	140	150	160	160
事故造成损失的总数 (万美元)	3,120	3,410	4,320	3,470	3,280	5,610

3. 在全世界民航飞机的事故中, 飞机全毁事故占23%, 死亡事故占17%。从发生事故的飞行阶段来看, 飞机全毁的事故总数中:

在离地/上升阶段所发生的全毁事故占27%;

在巡航阶段所发生的全毁事故占12%;

在进场/着陆阶段所发生的全毁事故占53%。

(上述数据从50年代以来几乎无变化)

4. 某种超音速歼击机在1971~1982年间所发生的故障(失效)总数中, 机械方面的故障占总故障数的41.2%; 特设方面占24.8%; 军械方面占14.9%; 无线电方面占19.1%。如果将上述专业细分成系统, 其主要失效模式及所占比例如表1.2~表1.6所示。

**表 1.2 飞机主要分系统失效比率**

分 系 统	液压系统	燃料系统	冷气系统	着陆装置系统
分系统失效数占飞机失效数的百分比	37.2	24.7	14.1	13.1

**表 1.3 发动机部分主要分系统失效比率**

分 系 统	润滑油系统	发动机主体	主燃料系统	加力燃料系统
分系统失效数占发动机失效数百分比	45.3	22.1	13.7	7.3

**表 1.4 特设部分主要分系统失效比率**

分 系 统	发动机 仪 表	氧气 设备	航向 仪表	姿态 仪表	全静压 仪 表	其它电气 设 备
分系统失效数占特 设失效数的百分比	20.9	14.5	14.0	11.7	10.9	9.4

**表 1.5 军械部分主要分系统失效比率**

分 系 统	枪 炮	瞄 准 具	座 椅 座 舱	导 弹 系 统
分系统失效数占军 械失效数的百分比	36.2	33.7	13.9	8.3

**表 1.6 无线电部分主要分系统失效比率**

分 系 统	电 台	测 距 器	罗 盘
分系统失效数占无 线电失效数的百分比	39.5	25.7	17.7

5. 造成飞机飞行事故的因素有：使用维护不良、工厂制造质量不佳、部队翻修质量等。据有的单位统计近30年来的情况表明：因维护不良引起的飞行事故占总失效数的**35.3%**；工厂制造质量引起的飞行事故占总失效数的**47.1%**；部队翻修带来的事故占**14.7%**；其它方面占**2.9%**。

6. 大量统计资料表明，由于人为差错引起产品的失效数，一般占总失效数的**20~40%**，即使是美国自动化程度较高的先进系统，人为差错所引起的失效数亦占总失效数的**30%**。

7. 造成一个设备或系统失效有各种原因。据美国海军电子实验室统计，在船用电子设备的失效原因中，设计不合理的失效占**40%**；元器件质量缺陷占**30%**；使用维护引起的失效占**20%**；制造工艺质量引起的失效占**10%**。国内一种复杂船用电子系统的失效，因设计不合理(包括对元器件的选用不合理)约占**65.5%**。

8. 由于技术水平的迅速提高，系统中大量采用电子元器

件\*，加上电子设备的广泛应用而遇到的环境条件复杂和严酷性（如月球上白天的温度高达 $+127^{\circ}\text{C}$ ，而晚上的温度低达 $-137^{\circ}\text{C}$ ，其温差为 $264^{\circ}\text{C}$ 。所以登月后，使用的电视摄影机和各种电子仪器，在此温差下正常工作是很难的），对系统或装备的可靠性带来不利的因素，在实际上系统或装备常因电子设备的失效而失效。

.....

——综观上述，面对系统或装备产生失效的大量事实及其后果，要想适应科技的发展，以及推动航空事业的发展，我们的着眼点不要把注意力只集中在所选用的元器件是否高可靠上，而更重要的是深入开展可靠性和维修性设计及制造工艺的研究。在可靠性研究过程中，人们从产品不断发生失效的实践中，总结出一套科学而又行之有效的失效分析技术，即失效模式及其影响分析法，该法已成为系统可靠性分析及评估方法中的内容之一\*\*。本书就是围绕这一问题进行阐述的。

## §1.2 失效分析中的一些基本概念

### 1.2.1 失效(故障)(Failure)

#### 1. 失效的定义

在可靠性分析与设计中，明确失效的定义是十分重要的，它是可靠性分析与设计的前提。这是因为失效的定义不同，其可靠性的特征值(如可靠度等)、数据处理及其评估结果均不相同。故在失效分析中首先要明确失效的定义。

按国标(GB3187-82)规定，失效是“产品丧失规定的功能。对可修复产品通常也称为故障”。因此，在一般情况下“失效”与

- 40年代歼击机上电子设备有600个元器件；60年代歼击机上电子设备有9,000个元器件；70年代歼击机上电子设备有 $10^5$ 个元器件；SpY-1雷达有电子元器件 $10^6$ 个；阿波罗飞船有电子元器件 $7 \times 10^7$ 个。
- 系统可靠性分析及评估方法主要包括：可靠性预计、可靠性分配、失效模式及其影响分析法、可靠性增长技术和可靠性试验等<sup>[9]</sup>。

“故障”是同义词，它们是指产品丧失了规定的功能，故有时是通用的；若要细分的话，“失效”用于不可修复的产品(如日光灯管)，“故障”常用于可修复的产品(如机床)。本书以采用“失效”一词为主。

我国电子工业部部标(SJ-2166-82)规定<sup>[15]</sup>失效的定义是，在一般情况下，失效是指：

- (1) 设备在规定条件下，不能完成其规定的功能；
- (2) 设备在规定条件下，一个或几个性能参数不能保持在规定的上、下限值之间；
- (3) 设备在规定的应力范围内工作时，导致设备不能完成其功能的机械零件、结构件或元器件的破裂、断裂、卡死等损坏状态。

在实践中，为概括所有可能发生的事件，给失效下了一个广义的定义：“失效(故障)是一种不合格的状态”，即凡是不符合原规定条件下所发生的事故就是失效(故障)。

——因此，失效与人们预先规定的要求、任务密切相关。所以，判断产品或元器件是否失效就必须预先确定失效的判别标准，即失效判据。失效判据不明确，就会造成用户或制造方在交易上、维修服务等方面引起不必要的纠纷。

## 2. 失效判据

为正确判断产品是否失效，处理好用户和承制方的关系，合理地确定失效判据是很重要的，它的确是失效分析或可靠性分析的依据之一。

按日本工业标准(JISZ8115-1970)规定<sup>[17]</sup>，失效判据是“判断是否构成失效的界限值”。这一规定表明失效判据是衡量产品或系统是否失效的标准。

不同的产品有不同的失效判据，难以做到统一的格式。现以某广播器材厂在分析电视发射设备上变频分系统的经验为例说明此问题。

产品在交付和例行试验中，通常以技术参数中的任一项不符合规定的允限作为失效判据。但在可靠性分析时并非按上述允限作为失效判据。比如电视发射设备的验收指标要足以保证5级（优、良、中、差、劣）质量并有一定裕量，而在实际使用中则一般按关机修理才算失效，即按最终效应是关机或图象质量下降至有厌恶感（差）作为定义系统的失效判据，然后按分系统功能下降对系统最终效应的作用来相应确定分系统的失效判据，具体如表1.7所示。

表 1.7 上变频分系统的失效判据

失效判据组别	I	II	III
输出功率 dB*	- 3	- 7	- 13
频 响 dB	3	6	10
互 调 dB	- 46	- 40	- 32
相当于图象质量级别	4级(良)	3级(中)	2级(差)

\* 关于dB含义见附录2

由上述得知，电视机可靠性分析时失效判据比交付产品的指标低。表1.7中的指标实为**可接受**的性能指标，并非产品出厂的性能指标（比如电视机按国际规定有5级，其第5级是最高技术水平）。因此确定失效判据的原则是：

- (1) 不能在使用条件下丧失其功能；
- (2) 失效判据大小“根据可接受的性能来确定”；
- (3) 不同产品可按该产品的主要性能指标进行衡量。

### 3. 失效的分类及其等级划分

#### (1) 失效的分类

进行可靠性分析时，应了解、掌握失效的分类，以便明确各种失效的物理概念，进而分门别类地解决各种类型的失效。

为研究的方便，现归纳各类失效如表1.8所示。



表 1.8 失效分类表

序号	分类	名称	英文名称	定义	取自何处
I	按失效原因分类	误用失效	Misuse Failure	不按规定条件使用产品而引起的失效。	GB3187-82
		本质失效	Inherent Weakness Failure	产品在规定的条件下使用, 由于产品本身固有的弱点而引起的失效。	GB3187-82
		初次失效	First Failure	一个产品的失效不是由于另一个产品的失效而直接或间接引起的失效。	IEC-271-74
		从属失效	Secondary Failure	由于另一个产品失效而引起的失效。	GB3187-82
		独立失效	Primary Failure	不是由于另一个产品失效而引起的失效。	GB3187-82
		早期失效	Early Failure	产品由于设计制造上的缺陷等原因而发生的失效。	GB3187-82
I	按失效的急速程度分类	偶然失效	Random Failure	产品由于偶然因素发生的失效。	GB3187-82
		损耗失效	Wear-out Failure	产品由于老化、磨损、损耗、疲劳等原因引起的失效。	GB3187-82
I	按失效的影响程度分类	突然失效	Sudden Failure	通过事前的测试或监控不能预测到的失效。	GB3187-82
		渐变失效	Gradual Failure	通过事前的测试或监控可以预测到的失效。	GB3187-82
II	按失效的影响程度分类	部分失效	Partial Failure	产品性能超过某种确定的界限, 但没有完全丧失预定功能的失效。	GB3187-82
		完全失效	Complete Failure	产品性能超过某种确定的界限, 以致完全丧失预定功能的失效。	GB3187-82