

FMECA METHODOLOGY AND APPLICATIONS

FMECA技术及其应用

(第2版)

陈颖 康锐 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

FMECA 技术及其应用

(第2版)

陈颖 康锐 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书在全面跟踪国内外 FMECA 技术发展的基础上,总结了 20 多年来在国内型号中应用 FMECA 的经验,以型号工程需求为主线,优选大量的工程应用案例进行了系统的编写。

本书共分 9 章及 3 个附录。在深入调研 FMECA 发展历史和应用现状的基础上,总结了通用 FMECA 程序与方法,分别阐述了功能及硬件 FMECA 及其应用、功能及硬件 FMECA 的故障模式获取方法与故障影响分析方法、故障模式机理与影响分析(FMMEA)方法软件 FMECA 及其应用、损坏模式影响与危害性分析(DMECA)及其应用、过程 FMECA 及其应用、FMECA 在可靠性系统工程中的应用、FMECA&FTA&ETA 综合分析方法及其应用;附录中还提供了全书缩略语、故障模式集和 FMECA 编码集。

本书为广大工程技术人员和管理人员开展 FMECA 工作提供技术支持,也可大专院校本科生和研究生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

FMECA 技术及其应用/陈颖,康锐主编. —2 版. —北京:国防工业出版社,2014. 5

ISBN 978-7-118-09427-5

I. ①F... II. ①陈... ②康... III. ①故障诊断—分析方法 IV. ①TB4—34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 067283 号

※
国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售



*
开本 710×960 1/16 印张 22 1/2 字数 402 千字
2014 年 5 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

第2版前言

FMECA(故障模式影响及危害性分析, Failure Modes, Effect and Criticality Analysis)是可靠性工程中应用最广泛、最基础的方法,其分析结果也是维修性、测试性、保障性、安全性分析的输入,如何做好 FMECA 工作是企业在产品研发过程中必须面临的重要课题。

2006 年,为了配合刚刚颁布实施的国家军用标准 GJB/Z1391《故障模式影响及危害性分析指南》,我们编著出版了本书第 1 版,受到广大工程技术和管理人员的欢迎。经过几年的发展,我们在推广 FMECA 实践过程中,又有了新的收获与体会,萌生了对本书修订的想法。陈颖博士勇挑重担,主动承担了本书第 1 版的修订工作。与第 1 版相比,本书的主要变化有:一是在危害性分析方法中,增加了模糊 RPN 方法以及存在备份设计情况下的定量危害性分析方法;二是增加了针对具有自主创新特征的产品,如何在研发过程中基于工程分析和试验获取可能的故障模式;三是在对每一故障模式可能产生的故障原因分析中增加了故障机理分析的步骤,形成了故障模式机理及影响分析(Failure Modes, Mechanism and Effect Analysis, FMMEA)方法;四是删掉了第 1 版中的第 8 章“计算机辅助 FMECA 工具”。同时,本书也沿用了第 1 版的部分章节,仅对其中的案例部分进行了增补。相信本书第 2 版能为读者提供做好 FMECA 工作更好的指导和帮助。

本书第 2 版共分 9 章 3 个附录。参加本书编写的有:陈颖(第 1、2、3、4 章,第 7 章部分案例及附录 B)、康锐(第 1、2、9 章及第 8 章部分内容)、陈立群、操军(第 3 章 3.1.2.2 节与 3.2.2 节)、徐萍(第 5 章及附录 A)、郭霖瀚(第 6 章及附录 C)、张建国(第 7 章)、马麟(第 8 章部分内容)。全书由陈颖统编,康锐主审。

本书第 2 版在编写过程中,吸收了国内外有关文献和技术资料,已逐一列入

参考文献,特向这些文献的作者表示感谢。编写过程中还得到了北京航空航天大学可靠性与系统工程学院陈云霞教授、许丹博士、张虹副教授以及中航工业第614研究所李胜泉研究员、刘富华研究员、薛丹高工、孙建平高工、吴为为等同志的大力支持,在此一并深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错,敬请读者赐教。

康 锐
2014 年 2 月

第 1 版前言

FMECA 是英文 Failure Modes, Effect and Criticality Analysis 的缩写, 名为故障模式、影响与危害性分析。FMECA 是分析产品中每一个可能的故障模式并确定其对该产品及上层产品所产生的影响, 以及把每一个故障模式按其影响的严重程度、同时考虑故障模式发生概率与故障危害程度予以分类的一种分析技术。

FMECA 作为分析产品故障因果关系的一种常用技术起源于美国。从 20 世纪 50 年代初至今, 已在国外许多国家、多个领域中被广泛应用。20 世纪 80 年代初, 我国在引进、消化 FMECA 的基础上, 大力推行 FMECA 技术, 在武器装备发展和科技工业建设中广为应用, 取得显著的效果。2006 年, 我国将原国家军用标准 GJB1391-92《故障模式、影响及危害性分析程序》更改为 GJB/Z 1391—2006《故障模式、影响及危害性分析指南》, 这必将进一步推动 FMECA 技术的应用与发展。

实践证明, FMECA 已成为可靠性系统工程(含可靠性 R、维修性 M、安全性 S、测试性 T、保障性 S, 缩写为 RMSTS)必不可少的重要技术基础之一。本书编写的指导思想是: 全面跟踪 FMECA 技术的发展, 系统的总结近 20 多年来国内型号中应用 FMECA 的经验, 以型号工程需求为主线, 选用大量的工程案例, 以满足广大工程技术人员和管理人员开展 FMECA 工作的需要, 本书也可作为大专院校本科生和研究生学习使用。本书共分 8 章 4 个附录。在阐述 FMECA 发展沿革和通用 FMECA 程序与方法的基础上, 分别描述了功能及硬件 FMECA 及其应用、软件 FMECA 及其应用、损坏模式影响与危害性分析(DMECA)及其应用、过程 FMECA 及其应用、FMECA 在可靠性系统工程中的应用、FMECA&FTA&ETA 综合分析方法及其应用、计算机辅助 FMECA 工具和 4 个附录(缩写语、故障模式集、FMECA 表格集和 FMECA 编码集)。

本书由康锐、石荣德主编。参加本书编写的有: 石荣德和康锐(第 1、2、7 章及全书统编)、徐萍(第 3 章及附录 A、附录 B)、郭霖瀚(第 4 章及附录 C、附录 D)、张建国(第 5 章)、马麟(第 7 章)、任羿(第 8 章)。全书由石荣德统审、康锐主审。

本书在编写的过程中,吸收了国内外有关文献和技术资料(尤其是北京航空航天大学可靠性工程研究所信息中心编写整理的运7飞机故障模式及其相关资料),曾得到赵宇、常文兵、扈延光、石君友、张虹(后三位参与了校审)以及付革利、张力勇和房占军等同志的大力支持,在此一并深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错,敬请读者赐教。

作者
2006 年

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述.....	1
1.2 FMECA 技术的发展概况	1
1.2.1 FMECA 技术的起源与发展	1
1.2.2 FMECA 国内外标准的发展与沿革	2
1.2.3 FMECA 在国内外的应用情况	7
1.2.4 FMECA 在国内外应用情况对比	12
1.3 FMECA 的目的和作用.....	13
1.4 FMECA 的基本步骤.....	14
1.4.1 FMECA 通用的基本步骤	14
1.4.2 FMECA 工作要点	16
1.5 FMECA 方法的类型及应用.....	17
1.5.1 FMECA 方法的类型.....	17
1.5.2 不同类型的 FMECA 方法的应用和目的	17
1.6 如何抓好 FMECA 工作项目	18
1.6.1 认真执行 FMECA 的工作原则	18
1.6.2 切实抓好 FMECA 工作项目的责任落实	19
1.6.3 认真贯彻 FMECA 的正确做法	20
第 2 章 功能及硬件 FMECA 的原理与步骤	21
2.1 概述	21
2.2 功能法与硬件法的比较	21
2.3 功能及硬件 FMECA 的实施	22
2.3.1 功能及硬件 FMECA 的步骤	22

2.3.2	功能及硬件 FMECA 的准备工作	23
2.3.3	功能及硬件 FMECA 的实施	31
2.3.4	功能及硬件危害性分析(CA)的方法	43
2.4	功能及硬件 FMECA 的要点	61
2.5	功能及硬件 FMECA 的应用案例	62
2.5.1	某型通信接收机分系统的功能 FMECA	62
2.5.2	某型军用飞机升降舵操纵分系统的硬件 FMECA	68
2.5.3	某型加热系统的硬件 FMECA	74
2.5.4	某信号控制电子设备的 FMECA	75
第 3 章	功能及硬件故障模式获取与故障影响分析方法	87
3.1	故障模式获取方法	87
3.1.1	概述	87
3.1.2	基于工程分析获取故障模式的方法	87
3.1.3	从试验中获取故障模式的方法	99
3.1.4	故障信息数据库的构建与数据收集	103
3.2	基于仿真的故障影响分析方法	107
3.2.1	电子产品故障影响仿真分析方法	108
3.2.2	案例应用——某信号处理电路的故障影响分析	115
第 4 章	故障模式、机理与影响分析方法	126
4.1	概述	126
4.2	故障物理学	127
4.2.1	概述	127
4.2.2	产品常见故障机理	127
4.2.3	故障机理关系矩阵	135
4.3	FMMEA 的步骤与实施	137
4.3.1	流程与实施步骤	137
4.3.2	系统定义	137
4.3.3	确定潜在故障模式	138
4.3.4	分析潜在故障原因	138
4.3.5	确定潜在故障机理	139
4.3.6	选择故障物理模型	139

4.3.7	故障影响分析	139
4.3.8	填写 FMMEA 表	142
4.4	FMMEA 应用案例——某电子数据存储设备的 FMMEA	143
第 5 章	软件 FMECA 及其应用	152
5.1	软件 FMECA	152
5.1.1	概述	152
5.1.2	软件故障模式及影响分析	153
5.1.3	软件危害性分析	157
5.1.4	SFMECA 的注意事项	161
5.2	软硬件综合 FMECA	162
5.2.1	概述	162
5.2.2	嵌入式软件 FMECA	162
5.2.3	软硬件综合 FMECA	166
5.3	应用案例	167
5.3.1	某型发动机测速软件的 SFMEA	167
5.3.2	某型号嵌入式软件通信模块的 SFMECA	170
第 6 章	DMECA 及其应用	175
6.1	概述	175
6.2	损坏模式与影响分析的基本概念与应用范围	175
6.2.1	DMEA 的基本概念	175
6.2.2	DMEA 的应用范围	177
6.2.3	DMEA 研究的主要内容	178
6.2.4	DMEA 的分析重点	178
6.2.5	DMEA 的步骤与实施	183
6.3	危害性分析	186
6.3.1	定性的 CA 方法	187
6.3.2	定量的 CA 方法	188
6.3.3	危害性矩阵绘制方法	190
6.4	DMECA 的要点	190
6.4.1	明确 DMECA 与生存力的关系	190
6.4.2	DMECA 与 FMECA 的关系	191

6.4.3	提高 DMECA 的分析效率	191
6.5	DMEA 的应用案例	191
6.5.1	某型飞机燃油系统的 DMEA	191
6.5.2	某型飞机发动机系统 DMECA	193
第 7 章	过程 FMECA 及其应用	198
7.1	概述	198
7.2	PFMECA 的目的与步骤	199
7.2.1	PFMECA 的目的	199
7.2.2	PFMECA 的步骤	199
7.3	PFMECA 的实施	207
7.3.1	填写 PFMECA 表	207
7.3.2	实施 PFMECA 工作的要点	208
7.4	PFMECA 的案例	209
7.4.1	某型导弹固体火箭发动机零件 “壳体圆筒”的 PFMECA	209
7.4.2	某型导弹固体发动机组件“壳体组合”的 PFMECA	214
7.4.3	某电路板波峰焊工艺 FMECA	218
第 8 章	FMECA 在可靠性系统工程中的应用	232
8.1	概述	232
8.2	FMECA 在可靠性设计分析中的应用	233
8.2.1	简述	233
8.2.2	FMECA 在可靠性分析中的应用	233
8.3	FMECA 在维修性设计分析中的应用	240
8.3.1	简述	240
8.3.2	FMECA 在维修性设计分析中的步骤与实施	241
8.3.3	应用案例:某型导弹地面检测设备 FMECA 在维修性分析中的应用	245
8.4	FMECA 在安全性设计分析中的应用	246
8.4.1	简述	246
8.4.2	FMECA 在安全性分析中的实施	248
8.4.3	安全性分析中的 FMECA 工作需要注意的事项	249

8.4.4	应用案例:某型航天器返回舱推进系统 FMECA 在安全性分析中的应用	249
8.5	FMECA 在测试性分析工作中的应用	251
8.5.1	简述	251
8.5.2	FMECA 在测试性分析中的步骤与实施	251
8.5.3	应用案例: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	253
8.6	FMECA 在保障性分析工作中的应用	255
8.6.1	简述	255
8.6.2	FMECA 在保障性分析中的步骤与实施	255
8.6.3	某型火炮反后坐装置的复进机内筒 FMECA 在保障性分析中的应用	258
第 9 章	FMECA、FTA、ETA 综合分析方法及其应用	260
9.1	概述	260
9.2	FTA 的概念及有关问题	261
9.2.1	FT 中的事件与逻辑门	262
9.2.2	人工演绎建故障树示例	264
9.2.3	故障树的规范化、简化和模块化	267
9.3	ETA 的基本概念及有关问题	267
9.3.1	事件树中各类事件的定义	267
9.3.2	ETA 的步骤	268
9.3.3	不同类型事件树的建造	270
9.3.4	事件树的定量分析及计算	274
9.3.5	后果事件的风险评估	277
9.4	FMECA 与 FTA 综合分析方法及其应用	278
9.4.1	FTF 方法的基本原理	278
9.4.2	FTF 方法的步骤与实施	279
9.4.3	正向 FTF 方法的应用案例:某型飞机直流 供电系统的 FTF 分析	280
9.4.4	逆向 FTF 方法的应用案例	287
9.5	ETA 与 FTA 综合分析方法及其应用	295
9.5.1	ETF 方法的基本原理、步骤及实施	295

9.5.2 ETF 方法的两个应用案例	296
附录	306
附录 A 缩略语	306
附录 B 故障模式集	308
附录 C FMECA 编码集	331
参考文献	344

第1章 绪 论

1.1 概 述

历史上发生的若干重大事故给国民经济、武器装备发展和科技工业建设带来重大损失和严重影响。人们面对一系列的事故时,深感不能被动等待事故发生后再采取故障分析、设计改进与使用补偿措施,必须防患于未然,在事前就应运用故障预防分析方法、采取有效的预防措施,以避免或减少事故的发生。因此,人们从经验、教训和长时间的实践中,总结出一套科学而又行之有效的故障预防分析技术,其中公认的 FMECA 技术就是产品可靠性系统工程设计与分析中普遍采用的故障预防分析的方法之一。

FMECA 是英文 Failure Modes, Effect and Criticality Analysis 的缩写,意为故障模式、影响与危害性分析。FMECA 是分析产品中每一个可能的故障模式并确定其对该产品及上层产品所产生的影响,并对每一个故障模式按其影响的严重程度、同时考虑故障模式发生概率与故障危害程度予以分类的一种分析技术^[1]。

1.2 FMECA 技术的发展概况

1.2.1 FMECA 技术的起源与发展

FMECA 由 FMEA(故障模式与影响分析)和 CA(危害性分析)两部分组成。FMEA 技术起源于 20 世纪 50 年代,美国格鲁门飞机公司在研制飞机主操纵系统时采用了该方法,虽然未进行 CA,但仍然取得了良好的效果。

1964 年, J. S. Cuntinbo 在纽约科学院提出了“故障模式影响分析”的描述,这是对 FMEA 概念最早的正式提出,并描述了如何进行 FMEA。20 世纪 60 年代中期, FMEA 技术正式用于美国航天领域的阿波罗计划。

20 世纪 70 年代, FMECA 技术开始形成各种标准。

20 世纪 80 年代初, FMECA 进入微电子工业,美国联邦航空局明文要求航空系统的设计及分析过程中必须进行 FMECA 工作。20 世纪 80 年代中期,美国

汽车工业开始应用过程 FMECA 方法。20 世纪 90 年代后, FMECA 在国外已经形成一套科学而完整的分析方法。

在 20 世纪 80 年代初期, FMECA 的概念和方法逐渐被国内接受。目前在航空、航天、兵器、舰船、电子、机械、汽车、家用电器等工业领域, FMECA 方法均得到了一定程度的普及, 为保证产品可靠性发挥了重要的作用。可以说该方法经过长时间的发展与完善, 已经获得了广泛的应用与认可, 成为在系统研制中必须完成的一项可靠性分析工作。

1.2.2 FMECA 国内外标准的发展与沿革

FMECA 标准主要分为军用标准和民用标准两大类。图 1-1 为各种 FMEA/FMECA 标准的发展与沿革关系。民用标准中又以汽车行业标准和电子行业标准为主。军工标准以 MIL-STD-1629A 为代表, 汽车行业的 FMEA 标准或规范以 QS 9000 FMEA 手册为代表, 微电子行业的标准以 IEC60812 为代表。

1.1.1.1 国外军用 FMECA 标准

FMECA 标准最早可以追溯到 1949 年 11 月 9 日美国通过的 MIL-P-1629, 中文名称为“进行故障模式影响和危害性分析的程序”, 它也是 MIL-STD-1629 的参考。

1974 年, 美国国防部发布美军标 MIL-STD-1629《舰船故障模式、影响及危害性分析》; 1976 年颁布了 MIL-STD-2070(AS)《航空设备的故障模式、影响及危害性分析程序》, 供海军航空系统司令部使用, 也可供国防部所属部门使用, 它是美军标 MIL-STD-785《设备及系统研制与生产阶段的可靠性大纲》关于系统/设备设计与研制过程中 FMECA 和关键产品确定等要求的补充。1980 年, MIL-STD-1629 被 MIL-STD-1629A《故障模式、影响及危害性分析》^[1] 所代替, 该标准内容比较详尽, 是目前美国现行标准。2001 年 9 月, 欧洲空间标准化组织发布了 ECSS-Q-30-02A《故障模式、影响及危害性分析》^[2], 该标准包含了设计 FMECA 和过程 FMECA。2006 年美国陆军部发布的 TM 5-698-4^[3], 给出了控制、通信、计算机等设备的 FMECA 方法步骤。

1.1.1.2 国外汽车行业 FMECA 标准

1988 年福特汽车公司先后出版《潜在设计故障模式及影响分析 (DFMECA)》、《过程 FMECA 实施指南》, 并在汽车设计与生产过程中应用。后来, 由于美国克莱斯勒、福特和通用三大汽车公司各有指南和格式来要求供应商提供 FMECA 报告, 这些指南和格式的差异导致了对供应商的额外要求。为了改善这种状况, 三大汽车公司建立了 QS9000 的认证标准, 规定要通过该标准认证的汽车零件供应商必须利用 FMECA 进行质量过程控制。1993 年, 这三大汽车公司

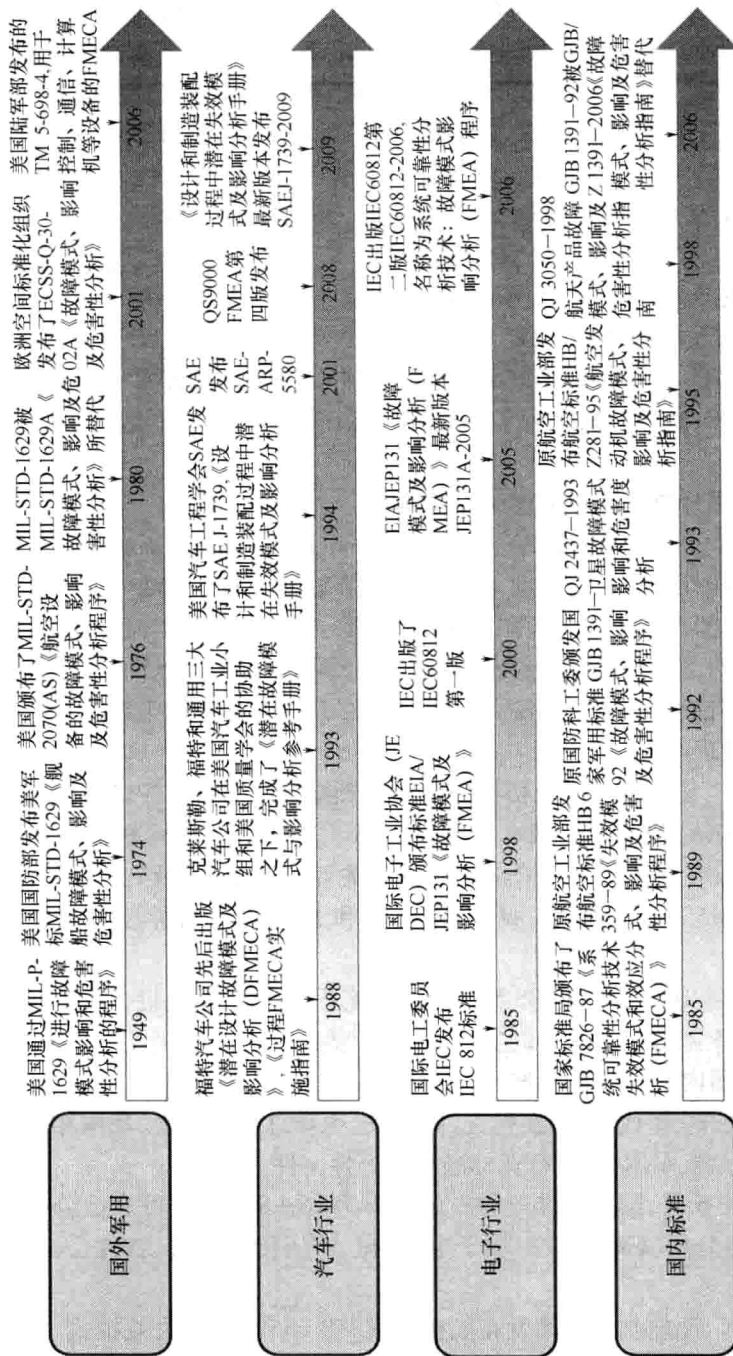


图1-1 国内外FMEA/FMECA现行标准的历史沿革

在美国汽车工业小组(Automotive Industry Action Group, AIAG)和美国质量学会(American Society for Quality, ASQ)的协助之下,完成了《潜在故障模式与影响分析参考手册》^[4],确立了 FMECA 技术应用于汽车工业发展过程中的必要性及要求标准。该手册 1993 年 2 月发布第一版,1995 年 2 月发布第二版,2001 年 7 月发布第三版,2008 年 6 月发布第四版。1994 年, FMECA 成为 QS9000 认证要求,而该手册成为了汽车及至其他企业在认证 QS9000 时的参考。

1994 年,美国汽车工程学会 SAE 发布了 SAE J-1739《设计和制造装配过程中潜在失效模式及影响分析手册》。该标准源于福特公司《过程 FMECA 实施指南》,目前最新版本为 SAE J-1739-2009^[5]。另外, SAE 在 2001 年发布了 SAE ARP 5580《非机动车用的故障模式和失效分析的推荐实施规范》,这一系列标准是与 QS9000 手册同源的,既适用于系统 FMEA 分析,也适用于软件 FMEA 分析。

1.1.1.3 国外电子行业 FMECA 标准

1985 年,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)出版 FMECA 标准 IEC 812,该标准是参考美军标 MIL-STD-1629A 并进行部分修改而成的。2000 年 IEC 出版了 IEC60812 第一版,在 2006 年又发布了第二版,名称为《系统可靠性分析技术:故障模式影响分析(FMEA)程序》^[6]。该标准中介绍了与软件错误有关的 FMEA 分析,将软件 FMEA 分析作为系统 FMEA 分析的一部分来处理。

1998 年,国际电子工业协会(JEDEC)颁布标准 EIA/JEP131《故障模式及影响分析(FMEA)》,目前的版本为 JEP 131A-2005^[7]。该标准应用于电子元件、子装配体、加工过程以及客户应用时的相关性能要求,涉及到封装设计、芯片设计、装配、制造、材料、质量、服务、供应商和为后续装配所必需的过程要求等方面。

民用标准还有英国的 BS 5760《建筑制造业产品、系统设备和部件可靠性分析》中的第 5 部分《FMECA 的实施步骤》^[8]等。

1.1.1.4 国内 FMECA 标准

20 世纪 80 年代初期,在引进、消化、应用和总结基础上,我国相继发布了一系列国家标准、军用标准、行业标准和指令性文件。

1985 年 6 月,国家标准局颁布了 GJB 7826—87《系统可靠性分析技术失效模式和效应分析(FMECA)》,用于电、机械、液压传动装置、软件、人类行为等的分析。

1989 年,原航空工业部发布航空标准 HB 6359—89《失效模式、影响及危害性分析程序》,该标准适用于航空产品的研制、生产和使用阶段,不适用于软件。