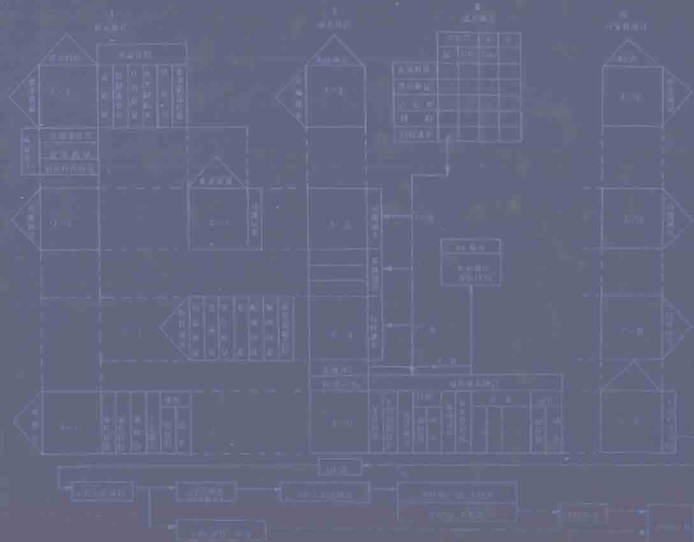




航天科技图书出版基金资助出版

适于大型复杂航天系统的 QFD与FMECA技术及应用

李跃生 林树茂 李文钊 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

适于大型复杂航天系统的 QFD 与 FMECA 技术及应用

李跃生 林树茂 李文钊 著

 中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

适于大型复杂航天系统的 QFD 与 FMECA 技术及应用/李跃生, 林树茂, 李文钊著. —北京: 中国宇航出版社, 2011. 2

ISBN 978-7-80218-919-5

I. ①适… II. ①李…②林…③李… III. ①航天系统工程—质量管理—应用软件, QFD、FMECA IV. ①V57-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 019816 号

策划编辑 易 新

责任校对 王 妍

责任编辑 易 新

封面设计 03 工舍

出 版 **中国宇航出版社**

发 行

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830

(010) 68768548

网 址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn

经 销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)

(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑

(010) 68371105 (010) 62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 6.5 字 数 179 千字

书 号 ISBN 978-7-80218-919-5

定 价 45.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

航天型号是一个大型复杂系统，涉及学科领域和承制单位众多，技术复杂，开发费用高，研制周期长，质量与可靠性要求高，协作面广。系统的质量与可靠性水平取决于设计，而设计质量取决于要求，不完整、不明确的要求会带来巨大的研制风险。这就需要在航天型号的论证、研制和生产中，尤其是在论证、研制的早期，结合工程实际，有效地开展质量与可靠性分析，把满足用户需求和预防故障的措施设计到系统中去。

质量功能展开（QFD）是一种分析、转换和展开用户需求的方法，尤其适用于产品开发的早期。故障模式、影响及危害性分析（FMECA）是一种对潜在故障进行预先分析的技术，适用于型号研制全过程，在我国航天科技工业推广应用已有 10 多年，成效显著。

这本论著的作者从 20 世纪 90 年代中期就开始了 QFD 技术的跟踪研究和航天型号研制过程的应用研究，针对大型复杂航天系统的特点，提出了一种适合多因素、复杂系统中应用的多维结构的 QFD 分析模型。最近几年，本书作者又提出了“四屋一表”结构的房屋型 FMECA 模型，并提出了适于型号研制全过程的 QFD 与 FMECA 技术相结合的分析模型和实施程序，使得对用户需求的正向分析与对潜在故障的反向分析有机结合。这是我国质量与可靠性工作者在自主创新的探索中取得的研究成果，具有很好的工程应用价值，期望在推广应用

进一步完善、发展。本书将两种质量与可靠性技术的分析模型、软件工具和工程应用有机结合，既有一定的理论高度，又具有实用性。

朱明让

2010 年 12 月

前 言

质量功能展开（QFD）技术是一种直观地对顾客需求进行分析、转换和展开的分析方法，尤其适用于产品开发早期。它是通过一系列矩阵式图形进行权重计算和相关分析，对多因素进行系统展开和综合权衡，具有形象直观、适用面广、可操作性强的特点。QFD 技术体现了“顾客至上”、“源头抓起”、“系统策划”和“定量化分析”等质量管理理念。

目前，QFD 技术在全球范围，尤其是工业发达国家已经较为普遍地应用，但是在我国航天科技工业尚未得到推广应用。其中一个重要原因就是对于大型复杂产品，如卫星、运载火箭的研制工作，由于相关因素众多，通行的二维结构的 QFD 分析模型过于简单。

故障模式、影响及危害性分析（FMECA）技术作为一种故障预先分析技术，用于系统、规范地分析设计方案中所有潜在的故障模式及其所有产生的原因、发生概率、影响后果和危害程度等，在此基础上提出有针对性的措施。它具有简单易懂、适用面广、可操作性强的特点。FMECA 技术突出了“预防为主”、“追求零缺陷”的质量管理理念。

目前，FMECA 技术已经十分成熟，并得到普遍重视和广泛应用。我国航天科技工业推广应用 FMECA 技术已有多多年。但是，目前应用的 FMECA 表的填写要求将所分析产品的各项功能的各种故障模式及其各种故障原因、故障影响等内容逐一

列出,在表上形成了从左向右展开的树状结构,致使 FMECA 表的篇幅过长,尤其是不便于故障共同模式、共同原因的分析。

QFD 与 FMECA 的结合可以对其各自的局限性进行互补,使得对顾客需求的正向分析和转换与对潜在故障的反向分析有机结合。通过与 FMECA 结合, QFD 技术的分析模型按型号研制过程展开时,对潜在故障隐患和不确定因素的分析更加透彻,专家在进行重要度、相关度定量化评价时更有把握,解决措施更加具有针对性。通过与 QFD 技术结合, FMECA 的输入信息与顾客需求的联系更加密切,分析输出结果的应用更加具有系统性。

本书作者从 1995 年开始进行 QFD 技术的跟踪研究和航天产品研制过程的应用研究,针对大型复杂航天系统的特点,创新性地提出了一种适合多因素、多层次复杂系统中应用的多维结构的 QFD 分析模型——系统屋技术,作为对 QFD 分析模型的深化和扩展。最近几年,本书作者进一步完善了系统屋技术分析模型,创新性地提出了“四屋一表”结构的房屋型 FMECA 模型和适于型号研制全过程的 QFD 与 FMECA 技术相结合的分析模型和实施程序。

2007 年年初,在本书所论述内容的研究课题技术成果鉴定会上,由中国科学院院士、运载火箭专家余梦伦,中国工程院院士、我国权威的质量管理专家刘源张,航天科技工业权威的质量与可靠性专家何国伟、邵锦成、朱明让等组成的成果鉴定组给出的鉴定结论指出,该课题的成果具有国内先进水平,其理论方法的研究成果是我国质量与可靠性专业自主创新的研究成果,具有很好的型号研制工程应用推广价值。同年,该课题获国防科技进步三等奖,开发的系统屋技术应用软件和房屋

型 FMECA 软件均取得了国家版权局颁发的计算机软件著作权。

撰写本书的意图是,对在 QFD 和 FMECA 技术适用于大型复杂系统的应用性、扩展性研究的成果加以总结、整理,为大型复杂航天系统的立项论证、方案研究和工程研制工作提供具有推广价值的系统分析方法。

本书共分为 8 章,其主要内容如下:

第 1 章比较全面地介绍了 QFD 技术,包括 QFD 的产生与发展、QFD 技术的概念和特点、QFD 反映的核心理念、二维结构的质量表和质量屋式的 QFD 分析模型。

第 2 章着重论述适合大型复杂系统的多维结构 QFD——系统屋技术的分析模型,包括二维结构的 QFD 分析模型在大型复杂产品研制中应用的局限性及系统屋技术的提出、系统屋的功能和特点、系统屋的结构、系统屋和系统屋系列建立的程序、系统屋的分析方法,并介绍了系统屋技术应用软件。

第 3 章把系统屋技术及其应用软件作为一个定量化的系统分析工具,给出了系统屋技术在 CZ—X 运载火箭总体方案论证中应用的案例。

第 4 章介绍了 FMECA 的产生与发展、FMECA 的概念和作用、FMECA 的类型、FMECA 的分析方式、FMECA 的实施过程和要点,为进一步提出和论述房屋型 FMECA 模型及与 QFD 的结合提供了基础。

第 5 章在分析 FMECA 列表式结构局限性的基础上,着重论述了在 FMECA 中引入 QFD 方法的质量屋矩阵式分析结构,把 FMEA 表和 CA 表扩展为对潜在故障模式、故障原因、故障影响、危害性分析和建议措施等的一组有机联系的房屋型矩阵式分析图表,即形成“四屋一表”式的 FMECA 模型,并阐述

了房屋型 FMECA 的特点,介绍了房屋型 FMECA 应用软件。

第 6 章阐述了房屋型 FMECA 技术及其应用软件在对某型运载火箭动力分系统中增压系统故障进行分析的应用案例,以及分析人员通过案例对房屋型 FMECA 方法及其软件工具的评价。

第 7 章在简要分析 QFD 与 FMECA 的联系与区别的基础上,着重论述了 QFD 与 FMECA 相结合的分析模型,包括在型号研制生产全过程 QFD 与 FMECA 结合的模式、在型号研制各阶段 QFD 与 FMECA 结合的基本模型以及在论证阶段、方案阶段、工程研制阶段 QFD 与 FMECA 结合的模式。

第 8 章给出了 QFD 与 FMEA 的结合模型在 CZ- $\times$ 运载火箭总体方案设计中的应用案例,阐述了应用系统屋分析模型对运载火箭总体方案进行正向分解展开和综合权衡,应用 FMEA 对系统级的潜在故障隐患进行反向分析,并把针对故障原因提出的建议和措施反馈、补充到系统屋中,再应用系统屋分析模型对各项措施进行综合权衡,从而完善系统方案。

本书的核心内容具有以下特点:

1) 针对大型复杂系统的特点,对比较成熟的 QFD 和 FMECA 模型在理论方法上有所创新,使之更适合在大型复杂的航天产品论证、研制中应用;

2) 将 QFD 和 FMECA 结合应用,并融入到型号研制各个阶段系统工程管理之中,从而克服单独、割裂地应用质量与可靠性技术的弊端,提高了应用效果。

3) 将 QFD 和 FMECA 的分析模型、软件工具和工程应用案例有机结合,使本书的内容既具有理论性,又突出了实用性。

本书可供从事航天系统论证、研制的工程技术人员和质量

管理人员使用，也可供从事航空、船舶、兵器等大型复杂产品研制的工程技术人员和质量管理人员，以及高等院校相关专业的师生参考。

中国运载火箭技术研究院的余梦伦、王小军，中国空间技术研究院的遇今、谷岩，中国航天标准化研究所的贺石彬、陈永宏、李福秋等同志参与了本书前期相关课题的研究工作；航天科技工业质量与可靠性专家何国伟、朱明让为本书申请航天科技图书出版基金资助专门写了推荐书；成都飞机设计研究所的邵家骏、中国航天标准化研究所的苗宇涛和中国宇航出版社的易新等同志为本书撰写和出版提供了许多帮助；中国航天标准化研究所卿寿松所长和中国宇航出版社石磊副社长等领导为本书的出版给予了大力支持和指导。在此，一并表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作 者

2010年10月

目 录

第 1 章 质量功能展开 (QFD) 技术概述	1
1.1 QFD 的产生和发展	1
1.1.1 QFD 技术在日本的产生与发展	1
1.1.2 QFD 技术在全球的传播与应用	2
1.1.3 QFD 技术在美国军事工业和宇航工业的应用	3
1.1.4 QFD 技术在我国引入与推行	3
1.1.5 QFD 技术在我国国防科技工业的引入、研究 与应用	4
1.2 QFD 的概念和特点	5
1.2.1 QFD 的概念	5
1.2.2 QFD 的特点	7
1.3 QFD 反映的核心理念	7
1.3.1 顾客需求牵引	8
1.3.2 从源头抓起	8
1.3.3 关注竞争性	8
1.3.4 体现系统性	8
1.3.5 定量化分析	9
1.3.6 多学科协同	9

1.4 质量表式的 QFD 分析模型	9
1.4.1 质量表式的 QFD 分析模型的结构	9
1.4.2 质量表式的 QFD 分析模型的内容	11
1.5 质量屋式的 QFD 分析模型	14
1.5.1 质量屋的结构	14
1.5.2 质量屋分析程序	17
1.5.3 质量屋应用案例	26
1.5.4 质量屋系列模型	28
 第 2 章 多维结构的 QFD 分析模型——系统屋	30
2.1 系统屋分析模型的提出	30
2.1.1 质量屋的二维结构限制了多因素相关分析和综合 权衡	30
2.1.2 质量屋的二维结构限制了 AHP 等定量分析方法 的应用	30
2.1.3 质量屋系列中结构与内容和步骤合为一体限制了 其应用的灵活性	31
2.2 系统屋的结构	32
2.3 系统屋和系统屋系列的建立	33
2.3.1 构建系统屋的系列	33
2.3.2 建立系统屋	34
2.4 系统屋的分析方法	35
2.4.1 确定输入因素各元素的权重	35
2.4.2 两因素相关分析	38
2.4.3 输出因素的综合	41

2.4.4 输出因素的各元素间的相关分析	42
2.5 系统屋的功能和特点	42
2.6 系统屋技术应用软件开发	43
2.6.1 系统屋应用软件开发的思路	43
2.6.2 系统屋应用软件的适用范围和主要功能	44
2.6.3 系统屋应用软件的输入和输出	44
2.6.4 系统屋应用软件的程序逻辑	45
2.6.5 系统屋应用软件的主要界面	49
第3章 系统屋技术在航天型号论证中的应用	51
3.1 系统屋系列的构建	51
3.2 任务需求分析屋	52
3.2.1 任务需求分析屋的输入和输出因素	52
3.2.2 开展任务需求分析屋分析	54
3.3 总体方案展开屋	62
3.3.1 总体方案展开屋的输入和输出因素	62
3.3.2 开展总体方案展开屋分析	64
3.4 液氧/液氢发动机展开屋	70
3.4.1 液氧/液氢发动机展开屋的输入和输出因素	70
3.4.2 开展液氧/液氢发动机展开屋分析	71
3.5 液氧/煤油发动机展开屋	73
3.5.1 液氧/煤油发动机展开屋的输入和输出因素	73
3.5.2 开展液氧/煤油发动机展开屋分析	73

第 4 章 故障模式、影响及危害性分析 (FMECA) 方法	77
4.1 FMECA 的产生和发展	77
4.1.1 FMEA 在美国的产生和发展	77
4.1.2 FMEA 在全球的传播	78
4.1.3 FMEA 在我国国防工业的引入和推广应用	78
4.2 FMECA 的概念和作用	79
4.3 FMECA 的类型	81
4.3.1 系统 FMEA	81
4.3.2 设计 FMEA	82
4.3.3 过程 FMEA	84
4.3.4 其他类型的 FMEA	85
4.3.5 CA 的类型	85
4.4 FMECA 的方式	86
4.4.1 功能及硬件故障模式与影响分析	86
4.4.2 危害性分析	87
4.4.3 其他 FMECA 分析	91
4.5 FMECA 的实施	93
4.5.1 FMECA 的基本步骤	93
4.5.2 提供 FMECA 的输入	94
4.5.3 编制 FMECA 计划	95
4.5.4 确定分析前提	96
4.5.5 通过填表的方式进行分析	98
4.5.6 编写 FMECA 报告	98
4.5.7 进行 FMECA 评审	99

4.5.8 实施 FMECA 应注意的问题	99
第 5 章 房屋型 FMECA 模型	101
5.1 房屋型 FMECA 模型的结构框架	101
5.2 故障模式分析屋	104
5.3 故障影响分析屋	107
5.4 故障原因分析屋	108
5.5 危害性分析表	110
5.6 建议措施分析屋	111
5.7 风险优先数分析对比表	112
5.8 房屋型 FMECA 模型的主要特点	113
5.9 房屋型 FMECA 应用软件	114
5.9.1 房屋型 FMECA 软件开发思路	114
5.9.2 房屋型 FMECA 软件的适用范围和主要功能	114
5.9.3 房屋型 FMECA 软件的输入和输出	115
5.9.4 房屋型 FMECA 软件的程序逻辑流程	117
5.9.5 房屋型 FMECA 软件的主要界面	118
第 6 章 房屋型 FMECA 在航天型号工程研制中的应用	120
6.1 房屋型 FMECA 应用案例背景	120
6.2 房屋型 FMECA 应用案例分析过程	121
6.2.1 运载火箭增压系统 FMEA 的约定	121
6.2.2 气瓶的房屋型 FMEA	121
6.2.3 增压管路的房屋型 FMEA	123
6.2.4 活门的房屋型 FMEA	125

6.2.5	气瓶手充气开关的房屋型 FMEA	129
6.2.6	增压孔板的房屋型 FMEA	129
6.2.7	贮箱的房屋型 FMEA	130
6.2.8	增压系统建议措施	133
6.3	房屋型 FMECA 应用案例的结论	144
6.3.1	运载火箭增压系统应用房屋型 FMECA 的结论	144
6.3.2	房屋型 FMECA 方法及其软件工具应用评价	145
第 7 章	在型号研制过程中 QFD 与 FMECA 结合的模式	147
7.1	QFD 与 FMECA 的联系与区别	147
7.1.1	QFD 与 FMECA 的共同点和不同点	147
7.1.2	QFD 与 FMECA 的局限性和互补性	148
7.2	在型号研制生产全过程 QFD 与 FMECA 结合的模式	149
7.3	在型号研制各阶段 QFD 与 FMECA 结合的基本模式	152
7.4	在论证阶段 QFD 与 FMECA 结合的模式	155
7.5	在方案阶段 QFD 与 FMECA 结合的模式	159
7.6	在工程研制阶段 QFD 与 FMECA 结合的模式	165
第 8 章	QFD 与 FMEA 结合的模式在航天型号方案设计中 的应用	171
8.1	运载火箭方案设计中 QFD 与 FMEA 结合的模式	171
8.2	型号任务需求分析屋	172
8.3	型号全箭 FMEA	172
8.3.1	全箭 FMEA 表	172
8.3.2	全箭故障模式和故障原因的相关分析	175