



航天科技图书出版基金资助出版

“三F” 技术 ——可靠性教程

FMECA, FTA and FRACAS Technology—Reliability Course

朱明让 何国伟 廖炯生 编著

FMECA

FMECA

FMECA

FTA

FTA

FRACAS

FRACAS

FRACAS



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

“三 F” 技术 ——可靠性教程

朱明让 何国伟 廖炯生 编著



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

“三 F” 技术 : 可靠性教程 / 朱明让, 何国伟, 廖炯生编著. -- 北京: 中国宇航出版社, 2017. 2

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1281 - 3

I. ①三… II. ①朱… ②何… ③廖… III. ①可靠性—教材 IV. ①TB114. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 041802 号

责任编辑 赵宏颖

封面设计 宇星文化

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010) 60286808

邮编 100830
(010) 68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010) 60286888
(010) 60286887

(010) 68371900
(010) 60286804 (传真)

零售店 读者服务部
(010) 68371105

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2017 年 2 月第 1 版

2017 年 2 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 6.625

字数 130 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1281 - 3

定价 68.00 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20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录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

今年是航天事业创建 60 周年。一代代航天人为了祖国航天事业的发展、壮大，为了使中国屹立于世界航天强国之林，自力更生，艰苦奋斗，顽强拼搏，勇于创新，铸造了以“两弹一星”、载人航天、月球探测为代表的一系列辉煌成就。我为有幸成为航天科技队伍中的一员，备感自豪和荣幸！

最近，朱明让同志告诉我，为庆祝航天事业创建 60 周年，准备将《“三 F”技术培训教材》正式出版。这本书最初是在 20 世纪 90 年代中期为航天工程技术人员进行可靠性技术培训而组织编写的，围绕故障（Fault）的预防、控制、纠正，介绍了故障模式、影响及危害性分析（FMECA），故障树分析（FTA），故障报告、分析和纠正措施系统（FRACAS）等三种可靠性分析与管理技术（简称“三 F”技术），并论述了三者间的关系与应用，是保证航天大系统可靠性的重要工作。朱明让希望我能为此书的正式出版作序。翻阅此书，让我又回想起 90 年代那段难忘的历程，同时也借机述说一下自己的亲身感悟。

20 世纪 90 年代初，载人航天工程、新一代导弹、卫星开展研制，要求技术上台阶；为进入国际发射服务市场，

要求进一步提高产品的可靠性和安全性；改革开放、军品锐减、走向市场，航天科技工业面临体制、机制和人员思想观念上的诸多不适应。大环境的变化给科研、生产、试验工作带来了新的挑战。人心不稳、管理不到位，产品质量问题不断出现，导致中国航天面临失败不起、没有退路的境地。

1993 年，中国航天工业总公司一成立，就决定从分析、解决现实质量问题入手，查找深层次原因。通过对 31 个型号在总装和靶场测试中暴露的 3250 个质量问题的分析来看，设计、制造、试验、采购各个过程失控相当普遍。问题产生的直接原因主要可分为两大类：一类是疏于管理和人心不稳、责任心不强造成的人为差错和重复故障；一类是限于技术水平和手段、能力，致使一些型号任务因“没想到”、“没做到”、“没测到”、“没试到”出现重大失误和失败，造成巨大损失。

要适应变化了的客观新形势，人们就得进一步发挥主观能动性，想方设法，变被动为主动。解决质量问题，绝不能就事论事，头痛医头、脚痛医脚或空喊口号，要从实际出发，运用系统的观点与方法，深化认识，制定对策，夯实基础，提高能力。总公司组织专门班子研究质量形势，制定了改革航天质量管理的方案，提出：各企事业单位要抓质量管理体系的有效运行，各型号要抓产品保证大纲的严格实施，质量专业要抓“三个一”（队伍、手段、方法）的基础建设，建立起自我保证与客观监督相结合的机制。同时，调整政策以调动各级、各类人员的积极性。

明确了思路和方向，我们从多方面着手采取措施。

针对手段、能力的不足，在政府和军队的支持下，我们实施了运载火箭生命工程、卫星长寿命工程、工艺振新计划等以保质量为重点的专项技术改造，在关键环节上配齐必要的、先进的加工、装配、试验、分析设备，全面提高研究、设计、制造、试验能力；还针对无法检、不能测等监督能力的缺失，实施质量专项技改，完善、建设了元器件可靠性保证中心、软件评测中心、失效分析中心、工艺研究中心、可靠性研究中心、质量与可靠性信息中心等22个技术支撑单位，提高检测、把关和技术保障能力。

针对管理松懈、责任心不强问题，首先从总公司机关开始，进行了思想、作风、纪律整顿，提高人员素质，弘扬航天精神；继而在全系统开展全员培训，把提高全员质量意识，特别是提高领导干部的质量意识放在首位，以从根本上转变对质量管理的认识和态度。总公司总经理、副总经理带头参加高层领导干部质量培训，型号总师、总指挥、总部机关司局长、各院院长80余人，分四期，脱产学习一周，并撰写论文。各院、局、基地组织约11万人、占比96%的军岗人员参加了各种培训。同时，实施了两种不同机制、不同政策的军民品分线管理，在国家支持下争取了相关的政策，解决了军品人员的后顾之忧；稳定了军品队伍，放活放开了民品的发展。

为规范管理，建章立制，强化设计、制造过程控制，总公司陆续组织制定了《航天型号可靠性管理暂行规定》、

工程管理的“72条”^①、质量管理的“28条”^②、质量问题的“归零双五条”等法规性文件；发布总经理责任令，严格落实责任制；在型号研制过程开展分阶段质量复查、“双想”活动、复核复算的基础上，全面推进“三 F”技术应用，促进设计人员全面地、系统地思考，尽可能防止和减少因“没想到”、“没做到”、“没测到”、“没试到”而出现的问题；针对设计过程质量难控的特点，在做好转阶段评审的基础上，增加可靠性、元器件、软件、工艺专题设计评审，同时，成立相对固定的专家组支持科学决策；以确保可靠性为重点，严格控制技术状态更改；加强航天型号电子元器件选用管理和飞行软件的独立评测，实施重大质量事故审查制度和故障信息通报制度等。

为防止重复故障和人为差错的再发生，提出了质量问题“归零”的“双五条要求”，并严格实行“不归零，不准转阶段；不归零，不准出厂；不归零，不准发射”，防止“归零”工作走过场。归零的“双五条要求”经过多年的成功实践已提炼成为国家航天标准，还被国际航天界采纳成为国际航天标准；中国航天也因“归零”的独创性工作赢得了首届国家质量奖。

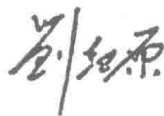
“三 F”教材正是在这种环境下组织编写的，作为培训教材，系统地介绍了“三 F”技术基本概念、原理、方法和相互关系及其在研制过程中的作用，是老一代航天可靠性

① 中国航天工业总公司强化航天科研生产管理的若干意见。

② 强化型号质量管理的若干要求。

专家们的集体心血。把“三 F”技术作为一个组合，论述了它们之间的关系、区别及相互作用。在工程中综合应用“三 F”技术，可以起到预防、控制和纠正故障的良好作用。多年来，“三 F”技术对推动航天领域设计可靠性分析、研制试验风险分析、“归零”过程的机理分析、航天可靠性保证工作的深入开展、辅助航天型号重大的科学决策，以及为保证和提高航天型号可靠性起到了重要作用。

在航天事业创建 60 周年之际，在向航天强国进军的征途中，在创新驱动发展战略的实施中，我们将面临更大的挑战和更多的难题。公开出版《“三 F”技术——可靠性教程》，期望能帮助新一代航天设计师们，以及不同专业领域的工程技术人员和质量保证人员学习、了解、掌握好“三 F”技术，并结合各自的工程实际创造性地应用，以提高新产品和大系统的可靠性、安全性。更希望新一代航天人特别是可靠性专家们能在同故障作斗争的实践中不断总结、发展、创新，把“三 F”技术的研究、应用提高到新水平，使其发挥更大作用，取得更多成效。



2016 年 10 月

编著说明

航天人始终以周恩来总理提出的“严肃认真，周到细致，稳妥可靠，万无一失”的要求，进行着航天产品的研究、设计、制造、试验，并不断创新、攀登着新的高度。享受过成功的喜悦，也饱尝过失败的痛苦，不断丰富着与故障和困难作斗争的经验。

进入 20 世纪 90 年代，我国航天事业发展到一个新的历史时期，工程系统日益庞大复杂，技术全面上台阶，产品更新换代，队伍新老交替，管理从计划走向市场。为迎接新的挑战，加强队伍建设，航天系统组织编写了具有航天特色的管理干部岗位培训系列教材。我负责组织编写了《质量与可靠性管理》一书，并于 1993 年出版，该书全面、系统地介绍了产品保证的主要技术领域和管理方法。航天大系统的固有质量与可靠性是由设计确立的，通过制造实现，经试验验证，在使用中才显现出来，设计是整个航天大系统研制过程的关键环节。为提高设计可靠性，1993 年 3 月 22 日，召开了航天型号可靠性研讨会，形成了《航天型号可靠性工作暂行规定》，于当年 5 月发布。1994 年 3 月 22 日，首个航天质量日，面对严峻的航天质量形势，中国航天工业总公司领导要求据此规定对工程设计人员进行可

靠性技术培训，使他们通过系统的学习，能结合工程实际应用可靠性技术提高设计水平。总公司质量局指派我负责此项工作。当时，我感到最紧迫的是如何防止、控制故障的发生，尽快降低发射、飞行过程的故障率，就从《航天型号可靠性工作暂行规定》中要求进行的可靠性分析、试验、管理众多工作项目中，精选出最重要、最好理解、见效又最快的三项可靠性工作：故障模式、影响及危害性分析（FMECA），故障树分析（FTA），故障报告、分析和纠正措施系统（FRACAS）。

这三项工作都是围绕故障（Fault）展开的，故将其取名为“三 F”技术。FMECA 可用于系统研制的各个阶段，对各层次产品可能出现的故障模式、影响及危害程度进行全面分析，以及早发现薄弱环节，采取措施。FTA 用于重点分析，在设计阶段仅用于对系统运行过程中的关键环节或关键事件发生的可能原因及相互关系进行分析推断，以尽早在工程上采取规避对策；也可在产品发生故障后，帮助查找导致故障原因的事件链。FRACAS 则是用于产品发生故障后，组织报告、分析、纠正的闭环管理，是实现“归零”的基础。

1994 年 3 月，邀请了资深的可靠性专家何国伟、廖炯生参加编写，经在航天系统内试讲、研讨，于 1995 年 3 月作为航天内部培训教材印发，同时印发了汇编的《航天故障启示录》。书中大部分内容，虽取之于有关可靠性资料和相应的标准，但把“三 F”作为一个组合，论述了它们之间的相互关系及在工程中的地位、作用，并融入了老一代航

天可靠性专家们的理解、经验、思考与创新。

20 多年来,该培训教材用于对一代代航天工程技术人员和可靠性保证人员进行可靠性培训,对帮助工程设计人员和产品保证人员学习掌握和应用“三 F”技术,进而做好、管好航天型号可靠性工作,管控型号试验风险起到了一定作用。推动“三 F”技术的普及和在航天工程中的广泛应用,为扭转当时严峻的航天质量形势和保证载人航天、月球探测等新一代航天工程顺利实施,以及为推动航天质量问题归零管理的不断深入,都起到了重要的作用。

当今,在建设航天强国的征途中,在航天队伍不断更新与壮大的新形势下,面对新一代航天工程要求的高可靠性和技术创新的高风险,继续深化“三 F”技术培训十分必要。近两年来,我陆续参加了国家国防科技工业局探月中心组织的质量检查,到航天系统内外有关单位,了解到一些“三 F”工作的实施情况,令我欣慰的是,大部分单位对型号各层级产品都开展了相应的工作。在任务多、时间紧的条件下,要在各个阶段把各层次产品的 FMECA 和不期望的关键事件的 FTA 工作都做得很好,确有难度;特别是需要各单位把几十年来自己产品研制、试验、使用中发生的所有故障加以全面系统的整理,建成数据库,以充分运用自己的经验,来支撑“三 F”工作的进一步深化,提高其对故障防、控、纠的有效性,目前的分析工作还有很大的改进空间,在防人为差错和可避免的重复故障方面尚需狠下功夫。

重大故障的根源多来自设计阶段。做好“三 F”工作是

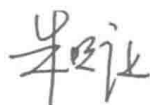
预防、控制、纠正产品故障的最有效方法，是促使设计师深入思考、推敲设计可靠性，增加设计透明度，提高设计评审质量，强化设计质量监督的重要途经。进一步提高对“三 F” 技术应用重要性的认识，不断推进“三 F” 工作深入到大系统的各产品层次、各研制阶段，以进一步提高设计质量，还任重道远。同时，在深化“三 F” 工作过程中，可促进各类产品故障数据库的建设、完善与有效运行，更好地进行经验的积累和知识的传承，进一步做好大系统故障的预防、控制和纠正，以确保航天型号的“万无一失”。为此，必须进一步对各级领导、总师系统、产品保证工程师们，一代一代地实施不断深化的“三 F” 技术培训。

《“三 F” 技术培训教材》虽然是在 20 多年前编写的，但它论述的基本概念和基本方法是比较经典的，对保证大系统的安全性和可靠性仍然是适用的和有效的。只是书中引用的技术与管理标准，近年有一些修订，这可在研读和使用时，结合当前工程特点去查询、参考。

在航天事业创建 60 周年庆祝之际，更名为《“三 F” 技术——可靠性教程》公开出版发行，弘扬它在航天发展过程助力航天走出低谷发挥的历史性作用，可为进一步拓展、深化它在航天及更广阔领域中的应用做出新贡献。

刘纪原同志为本书作序，他简要回顾了 20 世纪 90 年代初，面对国家改革开放的新形势，他带领中国航天工业总公司在实现工业部变企业、从计划到市场、军转民、走向国际等一系列重大变革中，针对面临的问题和困难所做的努力，帮助人们深刻理解本书编写的背景和初衷。并对运

用本书培训技术队伍，推动航天大系统安全性、可靠性工作的开展，助力航天走出低谷的贡献给予肯定。在本书再版过程中，组织有关专家对全书进行了校审，主要是改错、补漏，对个别地方作了些许修改。黎雨虹、任立明、朱北园、王琪和孙岩同志分别对全书各章节进行了认真校审，杨多和、杨双进同志为推荐本书出版付出许多努力，李梦白同志组织书稿录入，一院十二所和中国宇航出版社对本书的出版予以大力支持，在此一并感谢。



2016年10月

前 言

航天科技工业已进入一个新的历史发展时期，担负着国家发展航天的战略任务，各类高可靠性导弹、长寿命卫星、载人航天器相继开展研制，运载火箭开始步入国际市场。由于用户使用需求的不断提高，新技术的大量应用，加之国内外市场的激烈角逐，迫使我们不得不把提高系统效能和产品的可靠性放到极其重要的位置来考虑。

航天系统的高可靠性是通过设计确立和制造保证的。保证航天产品在使用环境下可靠地工作，必须改进传统的设计过程和制造过程，改进管理方法，以便经济有效地满足系统的可靠性要求。

国内外工程研制的经验证明，要保证可靠性要求的实现，必须运用可靠性分析技术和管理技术，从设计和工艺上去防止故障的产生，控制故障发生的概率，一旦故障发生，就要通过规范的管理程序去彻底加以纠正，并“举一反三”，防止类似故障再现。

故障模式、影响及危害性分析（FMECA），故障树分析（FTA）和故障报告、分析和纠正措施系统（FRACAS）是应用较广泛而又较为有效的三项可靠性技术（简称“三F”技术），对保证系统可靠性和安全性具有重要作用。在

国外航天、航空和军事装备研制领域普遍采用并取得良好的效益。

在我国航天系统研制过程中开展的质量复查、“双想”(回想和预想)、故障分析等质量保证活动,实际上已运用了“三 F”技术的思路,只是还不够系统和规范。进一步提高分析、管理水平,广泛运用“三 F”技术来改进我们的设计和管理已势在必行。

我们把各种导弹、卫星造出来,送上天的目标早已实现,但要更经济、更快地制造新一代导弹、卫星以满足各种用户的需求,特别是在多型号并举、军民品任务同步发展的条件下,实现这一新的更高的目标,不仅技术上要上水平,而且可靠性要上台阶,这是更加艰巨的任务。

编写这本教材是为了向广大工程设计人员系统介绍有关“三 F”技术的概念、原理和实施方法,结合若干事例分析讲解实施要领和注意事项,以便为工程应用提供指导。在利用本教材教学过程中,可以结合《航天故障启示录》中选编的某些故障实例进行讲解和学习,以便加深对“三 F”技术的理解。

把可靠性设计到航天型号中去是设计师的责任。只有广大工程设计人员学好、用好“三 F”技术,并结合各自型号的特点认真做好“三 F”工作,才能把航天型号可靠性提高到一个新水平。



1995 年 2 月 15 日

出版者的话

《“三 F” 技术培训教材》是根据航天工业总公司领导的要求，为满足广大工程技术人员学习和结合工程实际应用“三 F”技术的需要，由质量技术监督部组织编写的为培训航天工程设计人员使用的一本教材。

我们编写这本教材的出发点是：通过系统介绍“三 F”技术的基本概念、原理和方法，以及对航天工程实际事例的分析，着重讲清应用“三 F”技术的关键点和重点，并做到文字简练、通俗易懂，尽可能运用图表说明问题的实质、有关工作的相互关系和工作流程。

《“三 F” 技术培训教材》共分为 4 章。第 1 章概论，简要介绍与可靠性有关的一些基本概念、可靠性工程和“三 F”技术的主要内容，为系统学习“三 F”技术做准备；第 2~4 章分别为 FMECA 技术、FTA 和 FRACAS，较系统地介绍了“三 F”技术的基本概念、原理和方法，并附有工程应用实例和练习题。在教材中，“三 F”技术各成一章，在每一章后均列出了与该章有关的参考文献，以供大家查阅、参考。

编辑组于 1994 年 3 月 11 日成立，并召开了第一次工作会议，初步落实教材主要内容。1994 年 4 月 8 日召开了编