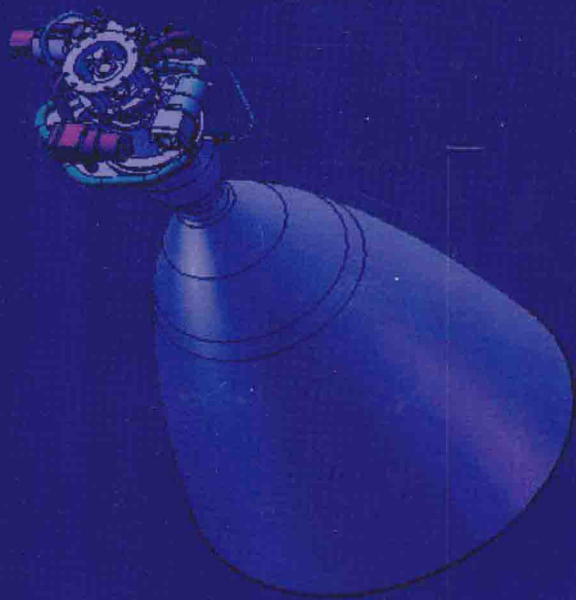




航天科技图书出版基金资助出版

液体火箭发动机可靠性

谭松林 李宝盛 等 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

液体火箭发动机可靠性

谭松林 李宝盛 等 编著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

液体火箭发动机可靠性/谭松林等编著. --北京:
中国宇航出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0744 - 4

I. ①液… II. ①谭… III. ①液体推进剂火箭发动机
—可靠性 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 151055 号

责任编辑 杨 洁

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出 版 社 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

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 北京画中画印刷有限公司

版 次 2014 年 7 月第 1 版

2014 年 7 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 12.75

字 数 355 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0744 - 4

定 价 98.00 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

前 言

一直以来，液体火箭发动机以高可靠、高质量为主要表征，奠定了航天发展的动力基石。在液体火箭发动机研制工作中，积累了大量的可靠性工程经验，形成了一套较为完整的液体火箭发动机可靠性工程研制范式，可靠性理念与工程技术早已融于具体的发动机设计、生产和实验与管理过程中。

为了进一步全面总结发动机可靠性工程研制经验，推广可靠性工作方法，聚焦液体火箭发动机可靠性工程领域共性问题，特编著《液体火箭发动机可靠性》一书。本书共分为8章，其中，第1章为发动机可靠性概论，站在发动机可靠性面临的现实问题这一高度来对全书所要涉及的内容进行高度概括，同时讨论发动机可靠性技术的发展趋势。第2章为任务剖面可靠性分析，全书一开始之所以安排这样一个章节，就是要试图将可靠性工程的概念贯穿到型号研制的始终，强调从任务剖面分析入手来揭示火箭总体对发动机明确或潜在的需求。第3章为系统可靠性建模与可靠性分配，传统的可靠性指标分配方法在很多教科书中都有涉及，但航天的发展需求已经对其提出了新的挑战，主要原因是新组件、新技术的使用越来越广泛，要合理地分配给组件和单元一个可靠性指标并按照这个指标开展设计与验证并不容易。第3章涉及了如何按照对象确定一个可靠性模型，内容包括：液体火箭发动机可靠性模型，液体火箭发动机组件可靠性指标分配，实例分析等。第4章为可靠性预计，包括可靠性预计概述、可靠性预计的目的和用途及分类、可靠性预计方法等。第5章为可靠性工程设计的一般方法，主要内容包括可靠性设计准则的制定与贯彻、冗余设计与容错设计、降额设计、裕度设计、

环境适应性设计。第6章为可靠性分析，主要内容包括可靠性分析方法概述、故障模式、影响与危害性分析（FMECA）、故障模式影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）。第7章为可靠性试验方法，发动机的可靠性验证、鉴定、增长方法在型号研制中不断推陈出新，实际上发动机可靠性增长是一个无模型方法，怎么拉偏和覆盖，以最省的方法发现薄弱环节和实现可靠性增长，是发动机研究领域迫切需要解决的现实问题，本章主要内容包括可靠性试验分类、环境应力筛选试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定与验收试验等。第8章为可靠性评定，主要内容包括可靠性评定的概念、单元可靠性评定方法、系统可靠性评定方法和性能可靠性评定方法等。第9章为可靠性管理，主要内容包括可靠性管理的一般要求、可靠性管理工作计划、外协与外购产品的监控、可靠性会签及评审、故障报告、分析与纠正措施、可靠性信息管理、培训与人员职责，以及技术状态管理等内容。

本书由谭松林负责统稿，王建昌参与了全书的策划。谭松林主要撰写第1章、第2章、第9章及附录，李宝盛撰写第3章、第4章、第7章和第8章，杪安安撰写第5章，江军撰写了第6章。在书稿的形成过程中，荆磊、张永、刘禾参与了部分校对工作，陈祖奎、蔡会让、章玉华、侯早提出了许多宝贵的修改意见。

本书在出版过程中得到了航天科技图书出版基金的大力资助和中国宇航出版社的鼎力支持。

书中内容难免有错误和疏漏之处，恳请关心和关注我国液体火箭发动机可靠性的专家、学者和工程技术人员及广大读者给予批评指正。

谭松林

2013年11月于西安

目 录

第 1 章 发动机可靠性概论	1
1.1 可靠性基本概念	2
1.2 发动机可靠性参数体系	5
1.3 可靠性技术工作的基本环节	7
1.4 液体火箭发动机可靠性工作简述	9
1.5 如何做好液体火箭发动机可靠性工作	15
参考文献	19
第 2 章 任务剖面可靠性分析	20
2.1 概述	20
2.2 任务剖面特征分析	21
2.2.1 一级发动机任务剖面分析	23
2.2.2 二级发动机任务剖面分析	24
2.2.3 三级发动机任务剖面分析	27
2.2.4 姿轨控发动机任务剖面分析	29
2.2.5 探月推进系统任务剖面分析	32
2.3 环境适应性分析	35
2.3.1 环境适应性分析策划	37
2.3.2 环境适应性分析方法	38
2.3.3 需要重点关注的方面	40
2.4 小结	42
参考文献	43

第3章 系统可靠性建模与可靠性分配	44
3.1 系统可靠性建模	44
3.1.1 可靠性建模概述	44
3.1.2 系统功能分析	48
3.1.3 典型系统可靠性模型	52
3.1.4 复杂系统可靠性模型	54
3.1.5 系统可靠性的精细化建模	56
3.2 发动机组件可靠性建模	58
3.2.1 推力室、发生器可靠性模型	58
3.2.2 涡轮泵可靠性模型	59
3.2.3 阀门可靠性模型	60
3.2.4 贮箱与气瓶可靠性模型	60
3.2.5 总装元件可靠性模型	61
3.3 系统可靠性分配	62
3.3.1 可靠性分配概述	62
3.3.2 可靠性分配的原理和准则	63
3.3.3 结构可靠性指标分配方法	64
3.3.4 性能可靠性指标分配方法	68
3.3.5 可靠性分配注意事项	70
参考文献	72
第4章 可靠性预计	73
4.1 可靠性预计概述	73
4.2 可靠性预计的目的和用途及分类	74
4.3 可靠性预计方法	75
4.3.1 相似产品法	75
4.3.2 应力分析法	78
4.3.3 机械产品可靠性预计方法	80
4.3.4 一次二阶矩方法	89
参考文献	96

第 5 章 可靠性工程设计的一般方法	97
5.1 概述	97
5.2 可靠性设计准则的制定与贯彻	98
5.2.1 可靠性设计准则的基本内容与特点	99
5.2.2 可靠性设计准则的制定	100
5.2.3 型号可靠性设计准则的贯彻	102
5.2.4 常用的可靠性设计准则	105
5.3 冗余设计与容错设计	107
5.3.1 冗余与容错的概念	107
5.3.2 冗余设计	108
5.3.3 容错设计	125
5.4 降额设计	131
5.4.1 概述	131
5.4.2 降额的一般要求	131
5.4.3 降额的具体要求	138
5.5 裕度设计	145
5.5.1 概述	145
5.5.2 安全系数设计	145
5.5.3 应力-强度干涉理论	147
5.5.4 概率裕度设计流程	151
5.5.5 承力结构件强度裕度概率设计	156
5.5.6 密封件密封裕度设计	165
5.5.7 耗损型产品寿命裕度设计	168
5.6 环境适应性设计	176
5.6.1 定义与基本概念	177
5.6.2 抗冲击、振动和噪声设计	185
5.6.3 热设计与低温防护设计	194
5.6.4 三防设计	199
5.6.5 电磁兼容设计	203

5.6.6 非工作状态下贮存环境适应性设计	208
参考文献	211
第6章 可靠性分析	212
6.1 概述	212
6.2 FMECA	213
6.2.1 FMECA 简介	213
6.2.2 FMECA 的目的和作用	214
6.2.3 FMECA 方法和适用范围	214
6.2.4 FMECA 的特点	216
6.2.5 定义约定层次	218
6.2.6 描述产品任务	219
6.2.7 定义故障判据	219
6.2.8 定义严酷度类别	220
6.2.9 FMECA 的工作步骤和实施	221
6.2.10 FMECA 应注意的问题	226
6.2.11 FMEA 应用案例——某姿控动力系统	227
6.2.12 FMECA 应用案例——某二级发动机系统	237
6.2.13 工艺 FMECA 简介	255
6.3 FTA	256
6.3.1 概述	256
6.3.2 故障树的常用符号	257
6.3.3 FTA 的目的和数据需求	258
6.3.4 FTA 建树方法和原则	258
6.3.5 FTA 建树步骤	259
6.3.6 FTA 定性分析	260
6.3.7 FMEA 与 FTA 的联系和区别	261
6.3.8 质量问题的 FTA 分析示例	262
6.3.9 进行 FTA 时应注意的问题	264
6.4 技术风险分析	265

6.4.1	概念定义	265
6.4.2	风险分析过程	265
6.4.3	风险分析的步骤和方法	266
6.4.4	风险分析报告	271
6.5	其他分析方法简介	272
6.5.1	潜在电路分析	273
6.5.2	蒙特卡罗分析	273
6.5.3	事件树分析	274
6.5.4	马尔可夫分析	275
参考文献		276
第7章	可靠性试验方法	277
7.1	可靠性试验简介	277
7.1.1	可靠性试验的分类	277
7.1.2	设计与分析	278
7.2	环境应力筛选试验	280
7.2.1	环境应力筛选试验简介	280
7.2.2	加速寿命试验	282
7.2.3	高加速应力筛选试验	283
7.2.4	发动机的环境应力筛选试验	283
7.3	可靠性增长试验	284
7.3.1	可靠性增长试验设计简介	284
7.3.2	可靠性增长模型	290
7.3.3	发动机可靠性增长试验分析	304
7.4	液体火箭发动机可靠性鉴定验收试验	312
7.4.1	简述	312
7.4.2	液体火箭发动机工作寿命及其可靠性	315
7.4.3	校准试车不分解情况下液体火箭发动机的飞行任务 可靠性	315
7.4.4	基于可靠性目标的鉴定验收试验方案的确定	317

7.5 昂贵、高可靠性产品批抽检验收的理论基础	321
7.5.1 简述	321
7.5.2 产品批抽检验收试验方案	322
7.5.3 高可靠性产品批抽检验收理论基础和验收方案风险分析	326
7.5.4 高可靠性产品批抽检验收方案风险算例	329
7.5.5 小结	331
参考文献	332
第8章 可靠性评定	333
8.1 可靠性评定的概念	333
8.2 单元可靠性评定方法	334
8.2.1 成败型单元可靠性评定	334
8.2.2 寿命型单元可靠性评定	336
8.2.3 正态分布强度-应力型模型可靠性评估	341
8.3 系统可靠性评定方法	346
8.3.1 系统可靠性评定方法简介	346
8.3.2 系统可靠性信息的综合方法	346
8.3.3 系统可靠性综合评定	348
8.3.4 某发动机可靠性综合评定案例	351
8.4 性能可靠性评定	355
8.4.1 性能可靠性点估计	356
8.4.2 性能可靠性置信下限估计	357
8.4.3 性能可靠性评定案例	359
8.5 贮存可靠性评定	360
8.6 可靠性评定最新进展	361
参考文献	362
第9章 可靠性管理	363
9.1 一般要求	363

9.2	可靠性管理工作计划	366
9.3	外协件、外购件的监控	368
9.4	可靠性会签及评审	369
9.5	故障报告、分析和纠正措施	372
9.6	可靠性信息管理	373
9.7	可靠性队伍和技术培训	377
9.8	不同人员可靠性职责	378
9.9	技术状态管理	379
参考文献		381
附录 A 国外运载火箭液体型号发动机飞行故障汇总		382
附录 B 可靠性相关标准		394

第1章 发动机可靠性概论

众所周知，航天事业在广播、通信、导航、国土资源普查等诸多领域中越来越体现出其重要作用，同时为科学研究与和平利用空间提供了宝贵的平台和经验，在对外太空的探索过程中也获得了很多有价值的成果。不管是火箭还是卫星，都离不开动力。动力的先进与成熟水平及产品可靠性，在某种程度决定了火箭与卫星的总体能力，因而提供动力的液体发动机可谓航天事业的重要基石，其性能与功能、可靠性、安全性日益得到高度的关注。

经过广大科研人员的不懈努力，发动机的推力量级从几牛发展到了几千千牛，发动机品种从单组元挤压式供应系统发展到了双组元开式循环常规推进剂发动机、液氢液氧低温发动机、先进无毒无污染大推力闭式循环液氧煤油发动机，发动机所使用的推进剂从常规可贮存有毒推进剂发展到了无毒推进剂和低温高性能推进剂。目前，我国已经形成了较为完备的液体火箭发动机产品体系与型谱，满足了民用航天的现实需求，为航天事业的发展和壮大奠定了坚实的动力基础。

我国液体火箭发动机的研制工作始终坚持质量与可靠性第一的思想，在液体发动机的可靠性设计、可靠性分析、可靠性试验、可靠性验证与评价等方面取得了丰硕的成果。发动机研制、生产、试验的过程就是一个不断提高可靠性、不断与故障作斗争的过程。如何进一步提高液体火箭发动机的成熟度水平，如何系统地利用可靠性技术来开发新产品，如何更好地指导发动机的研制生产，这些问题非常值得我们进行深入的研究。关于这一点，相关领域的管理人员、工程技术人员、专家学者已经达成了广泛的共识。

1.1 可靠性基本概念

(1) 可靠性

产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率称之产品的可靠性,也称可靠度。用数学形式表示为

$$R(t) = P(\xi > t)$$

不管是发动机组件还是整机,当我们研究一个具体的产品的可靠性问题时,总是把它看做一个整体,暂且不研究其内部关系及组成部分的可靠性如何,且认为产品无故障工作时间是一个随机变量,其分布函数是绝对连续的。

可靠性数学描述的精确定义所隐含的物理内涵有以下几点:

- 1) 可靠性总是相对一定任务、一定条件、一定任务时间来说的,不存在无条件、无历程的抽象可靠性。
- 2) 可靠性表征了一种概率尺度。
- 3) 可靠性是产品故障发生难易程度的度量。
- 4) 可靠性也是产品寿命裕度的度量。

关于可靠性的定义需要说明以下几点:

- 1) 产品——指零件、元器件、设备或系统等。
- 2) 规定的条件——指使用条件和环境条件等,常在产品使用维护技术文件与规范中明确。
- 3) 规定的时间——也称任务时间。规定时间有时不用时、分、秒计算,而用其他量纲表示,如继电器用触点开关的次数表示,规定时间一般是通过合同来决定的。

4) 完成规定的功能——是指制造设备或系统的目的。当不能完成功能时就称为故障,有时也称为失效。

故障指的是产品发生以下几种情况:

- 1) 不能工作;
- 2) 工作不稳定;

3) 功能退化等。

研究可靠性,首先要明确故障的内容,因为可靠性本身就是产品不出故障的概率,不能确定故障就不能计算概率。习惯上,从性能可靠性和结构可靠性两个维度对液体发动机的可靠性进行分析和评价。

(2) 任务剖面

任务剖面是指产品在规定任务时间内所经历的事件和环境的时序描述,包含工作状态、维修方案、工作时间与顺序、环境时间与顺序、任务成功或致命故障定义。

产品指标论证时就应提出或确定完整清晰的任務剖面。

(3) 寿命剖面

寿命剖面是指产品从制造到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。它包含一个或多个任务剖面。寿命剖面的关键因素包括:事件、事件顺序、持续时间、环境和工作方式。

产品指标论证时就应提出或确定完整清晰的寿命剖面。

(4) 概率密度函数、故障率函数、可靠度函数、累积故障分布函数

概率密度函数 $f(x)$ 表示随机变量的特征。对于给定的 x 值,其左侧概率密度函数下方的面积即为随机变量小于 x 的概率。因为概率密度函数表示完整的样本空间,整个概率密度函数下方的面积等于 1,即对于连续型随机变量

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, f(x) \geq 0$$

对于离散型随机变量

$$\sum_i p_i = 1, p_i \geq 0$$

故障率函数是用来表示故障趋势的函数。故障率函数值越大,趋于发生故障的概率就越大。故障率函数是在一个非常小的时间区间 $[x_0, x_0 + \Delta x]$ 内的瞬时故障率。故障率也称为瞬时故障率。在数

学上, 故障率函数定义为

$$\lambda(t) = \frac{f(x)}{R(x)}$$

式中 $f(x) = \lambda(x) e^{-\int_{-\infty}^x \lambda(\tau) d\tau}$;

$R(x)$ ——可靠度函数, $R(x) = e^{-\int_{-\infty}^x \lambda(\tau) d\tau}$ 。

因此, 如果已知故障率函数、可靠度函数和概率密度函数中的一个函数, 就可以得到另外的两个函数。

可靠度函数分别用时间函数和定义式表达如下:

时间函数

$$R(t) = P(\xi > t)$$

定义

$$R(t) = \frac{N_0 - r(t)}{N_0}$$

累积故障分布函数: 产品在规定时间内和规定的条件下, 丧失规定功能的概率 (不可靠度)。

累积故障分布函数分别用时间函数和定义式表达如下:

时间函数

$$F(t) = P(\xi < t)$$

定义

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0}$$

可靠度函数与累积故障分布函数的关系见 (图 1-1)

$$R(t) + F(t) = 1$$

可靠度函数与累积故障分布函数的关系如表 1-1 所示。

表 1-1 可靠度函数与累积故障分布函数的关系

	$R(t)$	$F(t)$
取值范围	$[0, 1]$	$[0, 1]$
单调性	非增函数	非减函数
对偶性	$1 - F(t)$	$1 - R(t)$