



航天科技图书出版基金资助出版

# 液体火箭发动机 质量管理与检测技术

马双民 主编



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 质量管理与检测技术

马双民 主编



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

液体火箭发动机质量管理与检测技术 / 马双民主编

—北京:中国宇航出版社,2017.11

ISBN 978-7-5159-1238-7

I. ①液… II. ①马… III. ①液体推进剂火箭发动机—质量管理 ②液体推进剂火箭发动机—检测 IV.

①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 290972 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

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 邮编 100830

(010)60286808 (010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900

(010)60286887 (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 11 月第 1 版

2017 年 11 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 23 彩插 4 面

字数 560 千字

书号 ISBN 978-7-5159-1238-7

定价 228.00 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，并于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发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金办公室负责申报，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的图书，应当是航天科技领域，具有自主知识产权、

宣传航天文化、普及航天知识、弘扬航天精神等，出版基金资助标准为：专著20—30万元。

欢迎广大航天科技人员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) 68757205、68758904

## 航天科技图书出版基金简介

### 《液体火箭发动机质量管理与检测技术》

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

陈新红 施 琳 程晋生  
王志强 王海军 杜 兵  
陈玉强 姜晓燕 殷满虎 单慕波 卢 兵  
刘 伟 余晓斌 洪 岩 李 祥 周明廷  
王建超 马 涛 张 涛 任文坚 吴文杰  
高亮平 张 勇 朱小明 王立新 陶 磊  
金 威 王 磊 杨鹏宇 张石欣 罗小涛  
杨怀宗 周 基 纪红源 柯晓东 李 强  
王品龙 陈晓斌 李 洋 于志海 白瑞欣  
康楚文 姜雪帆 朱 琳

# 《液体火箭发动机质量管理与检测技术》

## 编委会

名誉主任 张贵田 谭永华

主任 刘志让

主编 马双民

副主编 郭宽峰 同立军

执行主编 刘军生 张卫奇

编委	刘莉	刘元震	李海涛	秦建刚	王永红
	张权明	马如军	陈新红	施琼	程晋笠
	刘利平	姬红庆	王志强	王海军	杜兵
	陈玉强	梁晓鹏	殷满虎	单黎波	严兵
	刘伟	余继权	洪岩	李祥	闫明巍
	王建超	马涛	张腾	任文坚	吴文杰
	高荣平	张勇	华小明	王立新	陶秦
	全威	强薇	尚鹏宇	张万欣	罗小涛
	杨怀宇	闫操	纪红源	何晓京	李俊
	王晶龙	陈晓航	李洋	于忠海	白周健
	雍楚曼	姜雪锐	朱琳		

## 序

质量是航天的生命线，航天产品的质量从根本上决定着航天工业的生存和发展。液体火箭发动机是运载火箭的核心装置，被喻为运载火箭的“心脏”，在每一次航天发射中起着决定性作用。按照国家“发展航天，动力先行”的发展战略，液体火箭发动机的研制生产经历了从仿制到自行设计、独立自主研制的发展历程，为我国航天工业现有的国际地位奠定了坚实的动力基石。

在液体火箭发动机研制生产的过程中，立足自身发展需求，质量管理工作在对内外部环境进行分析的基础上，通过对宇航需求的识别，建立组织机构，明确各项工作之间的关系，对相应工作实施一系列监督、评价和改进工作，以PDCA循环的形式，持续实现质量管理工作的改进，全面、系统地地为各型号液体火箭发动机的研制生产搭建保证平台。型号产品质量管理工作注重提高过程控制和现场管理的工作质量，以确保液体火箭发动机产品实物的质量。

与此同时，随着先进管理方法的应用和先进技术的引进，检测技术已逐步贯穿液体火箭发动机的设计、制造、试验、产品在役、售后服务等全过程，特别是伴随着计量管理和计量检测、校准技术的提高，对于发动机研制生产过程的判定和处理，更加准确、全面和迅速。其中，材料理化检测管理按照国家标准建立了理化检测实验室认可质量管理体系，理化检测围绕材料理化检测管理的提升、材料的质量把关、为工艺或设计提供可靠的试验分析技术数据，以及理化检测技术和能力的提高等方面开展工作。无损检测技术向无损评价、在线检测、仿真检测和信息化管理等方向发展。

液体火箭发动机的发展需求推动着质量管理和检测技术进行有益的探索和实践，本书对液体火箭发动机研制生产的质量管理和检测技术工作进行了系统的总结和提炼，书中介绍了多种管理方法和技术工具的具体应用，具有较强的系统性、针对性、实用性，对从事液体火箭发动机设计、生产、试验、教学的科研人员 and 高校师生有重要的参考价值。

张贵田

中国工程院院士

2016年10月

# 前 言

中国载人航天工程、北斗导航工程、探月工程取得举世瞩目的成就，宇航高密度发射已经成为新常态。这些成就的取得与液体火箭发动机高质量、高可靠性工作是分不开的，液体火箭发动机一旦出现故障就可能導致航天发射失败。“航天发展，动力先行”，高可靠、高质量的液体火箭发动机是航天发射成功的基本保证。

本书总结论述了中国液体火箭发动机生产制造的质量管理与检测技术。全书共分为三个部分，第一部分是液体火箭发动机的质量管理体系，包括第1章概述、第2章质量基础管理、第3章质量检验、第4章型号质量管理；第二部分是计量管理、检测、校准和材料理化检测与分析，包括第5章计量管理与计量检测、校准技术，第6章材料理化检测管理与分析技术；第三部分为第7章的无损检测技术。

质量是航天永恒的主题。在多年液体火箭发动机生产制造的质量管理中，形成了一些具有特色的管理方法，如技术状态管理、工艺技术风险分析、特殊过程的质量控制、关重件及关键工序的质量控制、多余物控制、数据包管理和数字化质量管理等，本书的第一部分对这些特色的质量管理方法进行了详细的论述和解读。液体火箭发动机的结构复杂精密，工作环境十分恶劣，精确的检验、检测分析手段是确保发动机高质量的关键所在，本书的第二部分和第三部分总结了发动机生产过程中较为特殊的检验检测方法和分析手段，如小孔精密测量的计量检测技术、产品失效分析的理化检测分析技术及声发射检测、残余应力测定等无损检测技术。

在本书的编写过程中，参阅了国内外同行编写的相关资料，得到了航天质量管理方面专家及有关单位的大力支持和帮助，在此深表感谢！

由于本书涉及的内容广泛，编者水平有限，加之航天质量管理发展迅速，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

1302217

2016年8月

# 目 录

第1章 概 述 .....	1
1.1 液体火箭发动机的分类 .....	1
1.2 液体火箭发动机质量的重要性 .....	1
1.2.1 液体火箭发动机是高风险性的产品 .....	1
1.2.2 液体火箭发动机质量关系航天发射成败 .....	2
1.2.3 液体火箭发动机质量是航天发展的基础 .....	2
1.3 液体火箭发动机质量工作要求 .....	2
1.3.1 系统策划 .....	2
1.3.2 落实责任 .....	2
1.3.3 预防为主 .....	2
1.3.4 严格控制 .....	3
1.3.5 有效监督 .....	3
1.4 液体火箭发动机质量管理的发展与展望 .....	3
1.4.1 液体火箭发动机质量管理发展历程 .....	3
1.4.2 液体火箭发动机质量管理展望 .....	4
1.5 液体火箭发动机检测技术的发展与展望 .....	5
1.5.1 计量检测、校准的发展与展望 .....	5
1.5.2 材料理化检测的发展与展望 .....	6
1.5.3 无损检测技术的发展与展望 .....	7
第2章 液体火箭发动机质量基础管理 .....	9
2.1 液体火箭发动机质量管理体系 .....	9
2.1.1 质量管理体系的概念 .....	9
2.1.2 质量管理体系的建立与运行 .....	9
2.1.3 质量管理体系的评价与改进 .....	11
2.2 液体火箭发动机质量管理方法应用 .....	19

2.2.1	概述 .....	19
2.2.2	质量信息分析管理 .....	19
2.2.3	质量问题闭环管理 .....	24
2.2.4	质量管理小组活动 .....	29
2.2.5	现场 6S 管理 .....	33
2.2.6	六西格玛管理 .....	42
2.2.7	标准化管理 .....	45
	参考文献 .....	49
<b>第 3 章</b>	<b>液体火箭发动机质量检验 .....</b>	<b>50</b>
3.1	概述 .....	50
3.2	质量检验作用 .....	50
3.2.1	质量检验的概念 .....	50
3.2.2	质量检验的目的 .....	50
3.2.3	质量检验的职能 .....	50
3.3	产品质量检验 .....	51
3.3.1	产品质量检验依据 .....	51
3.3.2	产品质量检验类型 .....	51
3.3.3	产品质量检验要求 .....	51
3.4	质量检验管理 .....	57
3.4.1	首件三检管理 .....	57
3.4.2	不合格品控制中检验工作要求 .....	58
3.4.3	产品质量记录及质量证明文件管理 .....	59
3.4.4	检验印章的管理 .....	60
3.5	质量检验员管理要求 .....	61
3.5.1	检验员资格 .....	61
3.5.2	检验员职责 .....	61
3.5.3	检验员权限 .....	61
3.5.4	检验员培训 .....	62
3.5.5	检验人员考核 .....	62
<b>第 4 章</b>	<b>液体火箭发动机型号质量管理 .....</b>	<b>64</b>
4.1	原材料质量管理 .....	64
4.1.1	原材料供应商评价与管理 .....	64

4.1.2	原材料验收质量要求	65
4.1.3	原材料保管质量要求	66
4.1.4	原材料发放质量要求	67
4.2	技术状态管理	68
4.2.1	概述	68
4.2.2	技术状态标识	68
4.2.3	技术状态控制	69
4.2.4	技术状态纪实	69
4.2.5	技术状态审核	69
4.3	工艺技术风险分析	69
4.3.1	概述	69
4.3.2	工艺技术风险分析与控制工作程序	70
4.4	禁限用工艺控制	74
4.5	生产过程量化控制	75
4.5.1	特种工艺量化控制	75
4.5.2	螺纹连接量化控制	79
4.5.3	对外接口量化控制	85
4.6	特殊过程质量控制	88
4.6.1	概述	88
4.6.2	特殊过程识别原则及液体火箭发动机特殊过程项目	88
4.6.3	特殊过程质量控制要点及要求	89
4.6.4	特殊过程确认与再确认	90
4.7	关键件、重要件及关键工序的质量控制	92
4.7.1	概述	92
4.7.2	关键工序的确立和管理	92
4.7.3	关键件、重要件和关键工序的控制程序	93
4.7.4	关键件、重要件和关键工序的管理要求	96
4.8	不合格品控制	97
4.8.1	概述	97
4.8.2	不合格品审理原则	97
4.8.3	不合格品标识、隔离	97
4.8.4	不合格品审理	97

4.8.5	不合格品处置 .....	99
4.9	多余物控制 .....	101
4.9.1	概述 .....	101
4.9.2	液体火箭发动机常见多余物 .....	101
4.9.3	多余物控制技术的要求 .....	102
4.9.4	多余物控制管理要求 .....	104
4.9.5	一般常用的多余物检查排除方法 .....	105
4.10	外包质量控制 .....	105
4.10.1	概述 .....	105
4.10.2	供方的选择、评价和管理 .....	106
4.10.3	外包质量控制 .....	109
4.10.4	外包验收 .....	111
4.11	产品可追溯性管理 .....	112
4.11.1	概述 .....	112
4.11.2	产品标识管理 .....	112
4.11.3	文件管理 .....	114
4.12	产品数据包管理 .....	116
4.12.1	概述 .....	116
4.12.2	产品数据包的内容 .....	117
4.12.3	产品数据包的形成 .....	126
4.12.4	产品数据包应用 .....	126
4.12.5	产品数据包的保存 .....	128
4.13	产品质量检查确认和验收评审 .....	128
4.13.1	产品质量检查确认 .....	128
4.13.2	产品质量验收评审 .....	132
4.14	数字化质量管理 .....	133
4.14.1	概述 .....	133
4.14.2	必要性 .....	134
4.14.3	实施原则 .....	134
4.14.4	实施应用 .....	135
第5章	计量管理及计量检测、校准技术 .....	141
5.1	计量管理 .....	141

5.1.1	概述 .....	141
5.1.2	计量法规体系 .....	141
5.1.3	计量管理标准体系 .....	143
5.1.4	计量技术机构 .....	143
5.1.5	测量标准 .....	144
5.1.6	计量溯源性 .....	145
5.1.7	计量确认 .....	145
5.1.8	计量检定、计量校准、比对与计量确认之间的关系 .....	146
5.1.9	计量检定人员 .....	147
5.1.10	ABC 分类 .....	148
5.1.11	计量确认标签 .....	148
5.1.12	确认间隔 .....	148
5.1.13	封印 .....	148
5.1.14	不合格测量设备 .....	148
5.1.15	测量设备的配置 .....	149
5.1.16	测量不确定度 .....	149
5.1.17	过程的监视和测量 .....	149
5.1.18	计算机信息化技术的应用 .....	149
5.2	计量校准检定技术 .....	152
5.2.1	概述 .....	152
5.2.2	通用量具计量 .....	152
5.2.3	温度计量 .....	155
5.2.4	力学计量 .....	158
5.2.5	电磁计量 .....	161
5.3	液体火箭发动机精密检测技术 .....	162
5.3.1	概述 .....	162
5.3.2	接触式三坐标测量技术 .....	162
5.3.3	液体火箭发动机小孔精密测量技术 .....	167
5.3.4	非接触式光学影像检测技术 .....	173
5.3.5	复杂轮廓曲面扫描测量技术 .....	174
5.3.6	空间大尺寸测量技术 .....	177
5.3.7	螺纹检测技术 .....	183

5.3.8	形状误差及表面粗糙度检测技术 .....	184
5.3.9	齿轮综合测量 .....	189
5.3.10	超声波测厚技术 .....	192
	参考文献 .....	195
<b>第6章 材料理化检测管理与分析技术 .....</b>		<b>196</b>
6.1	理化检测质量管理 .....	196
6.1.1	概述 .....	196
6.1.2	理化检测质量管理体系的建立、运行与改进 .....	196
6.1.3	理化检测信息化管理 .....	198
6.2	金属材料化学成分分析技术 .....	199
6.2.1	概述 .....	199
6.2.2	化学分析 .....	199
6.2.3	仪器分析 .....	200
6.3	金属材料力学性能与工艺性能检测技术 .....	209
6.3.1	概论 .....	209
6.3.2	金属材料常规力学性能检测技术 .....	210
6.3.3	金属材料工艺性能检测技术 .....	216
6.4	金相分析技术 .....	218
6.4.1	宏观检测技术 .....	218
6.4.2	显微检测技术 .....	219
6.5	腐蚀试验检测技术 .....	224
6.5.1	概述 .....	224
6.5.2	盐雾试验 .....	224
6.5.3	湿热试验 .....	225
6.5.4	浸泡试验 .....	225
6.5.5	高温氧化试验 .....	226
6.5.6	应力腐蚀开裂 (SCC) 试验 .....	226
6.5.7	点蚀试验 .....	227
6.5.8	缝隙腐蚀试验 .....	227
6.6	产品失效分析技术与应用 .....	228
6.6.1	失效分析技术 .....	228
6.6.2	失效分析案例 .....	234

6.7 非金属材料理化检测分析技术 .....	254
6.7.1 概述 .....	254
6.7.2 非金属材料的特性 .....	254
6.7.3 聚四氟乙烯 .....	254
6.7.4 石墨密封材料 .....	255
6.7.5 石棉橡胶板 .....	255
6.7.6 胶黏剂 .....	256
6.7.7 抗化学介质润滑脂 .....	256
6.7.8 偶氮二异丁腈 .....	257
参考文献 .....	259
<b>第7章 无损检测技术 .....</b>	<b>260</b>
7.1 概述 .....	260
7.2 射线照相检测 .....	261
7.2.1 技术简介 .....	261
7.2.2 检测工艺要素 .....	261
7.2.3 底片影像的识别 .....	267
7.2.4 典型产品的检测应用 .....	278
7.3 超声波检测 .....	290
7.3.1 技术简介 .....	290
7.3.2 检测工艺要素 .....	291
7.3.3 超声波信号的识别 .....	293
7.3.4 典型产品的检测应用 .....	293
7.4 磁粉检测 .....	298
7.4.1 技术简介 .....	298
7.4.2 检测工艺要素 .....	299
7.4.3 磁痕显示的识别 .....	303
7.4.4 典型产品的检测应用 .....	306
7.5 渗透检测 .....	310
7.5.1 技术简介 .....	310
7.5.2 检测工艺要素 .....	310
7.5.3 渗透显示的识别 .....	312
7.5.4 产品的检测应用 .....	314

7.6 泄漏检测 .....	316
7.6.1 技术简介 .....	316
7.6.2 检测工艺要素 .....	316
7.6.3 典型产品的检测应用 .....	319
7.7 内窥镜检测 .....	321
7.7.1 技术简介 .....	321
7.7.2 检测工艺要素 .....	322
7.7.3 内窥镜图像的识别 .....	325
7.7.4 典型产品的检测应用 .....	326
7.8 其他无损检测技术 .....	328
7.8.1 声发射检测 .....	328
7.8.2 射线层析检测技术 .....	329
7.8.3 激光全息检测 .....	334
7.8.4 涡流检测 .....	336
7.8.5 残余应力测定 .....	339
7.9 无损检测管理 .....	341
7.9.1 检测机构的设置 .....	341
7.9.2 检测人员管理 .....	341
7.9.3 检测设备管理 .....	342
7.9.4 检测材料的管理 .....	343
7.9.5 检测文件的管理 .....	343
7.9.6 检测环境的控制 .....	345
7.10 无损检测的安全防护及管理 .....	346
7.10.1 电离辐射的安全防护 .....	346
7.10.2 紫外线的安全防护 .....	346
7.10.3 粉尘的安全防护 .....	346
参考文献 .....	348

# 第 1 章 概 述

## 1.1 液体火箭发动机的分类

液体火箭发动机是使用液体推进剂的化学火箭发动机。其主要功能是为运载火箭和各种飞行器提供动力，广泛应用于运载火箭、航天飞机、航天器。我国开展液体火箭发动机技术的研究起步于 20 世纪 50 年代，经过 60 多年自主创新的发展，先后成功研制了多个系列的液体火箭发动机，从常温推进剂到低温推进剂，从地面主级到空间变推，实现了从发射卫星到发射载人飞船和月球探测器的跨越式发展。

液体火箭发动机按照不同的方法分类情况如图 1-1 所示。

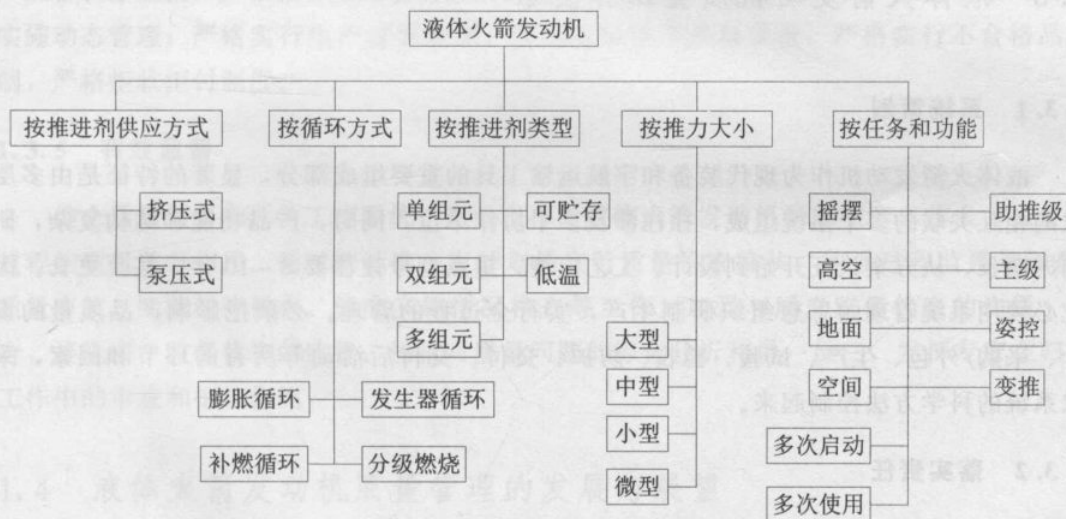


图 1-1 液体火箭发动机的分类

## 1.2 液体火箭发动机质量的重要性

### 1.2.1 液体火箭发动机是高风险性的产品

液体火箭发动机结构复杂，零部件多，技术涉及学科多；实际工作时，工况恶劣，温度、压力梯度大，工作压力高，热流密度大；结构动力学特征复杂，频域宽，多数零部