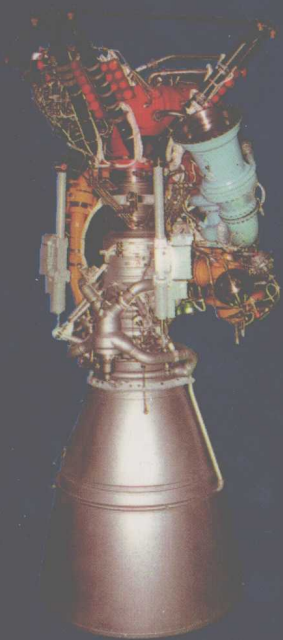


高压补燃液氧煤油发动机

High Pressure Staged Combustion
LOX/kerosene Rocket Engine

张贵田 著



高压补燃液氧煤油发动机

High Pressure Staged Combustion LOX/kerosene Rocket Engine

张贵田 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高压补燃液氧煤油发动机/张贵田著. —北京: 国防工业出版社, 2005. 8

ISBN 7-118-03589-0

I. 高... II. 张... III. 内燃机. 煤油 IV. TK46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 092850 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 18% 484 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 56.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

序

运载火箭是航天的基础支柱,而液体火箭发动机是运载火箭的核心,它的性能、构造,决定了运载火箭的使用价值,最终制约着航天的发展。

在提高火箭发动机性能研究中,发现只有提高,而且要大幅度提高燃烧室压力,才是最有效的措施。但是燃烧室压力超过10MPa(例如推力大于980kN),输送推进剂的泵功率要高,涡轮耗功大。据苏联专家格鲁西科(V. P. Glushko)自称,在1948年已公布自己的想法:必须将涡轮废气再利用,送入燃烧室中,引入配对组分,再次燃烧,是谓“补燃”。

20世纪50年代,世界上首次研制成功液氧煤油火箭发动机。苏联的洲际导弹、人造地球卫星、载人航天,美国的洲际导弹、载人航天、登月,均是用装液氧煤油发动机的火箭发射的。当时的液氧煤油火箭发动机都是采用燃气发生器热循环系统。在改用补燃系统中,难题频现:“炮式”起动,触发不稳定燃烧;富燃的燃气发生器煤油结焦;燃烧室喉部烧蚀。这些难题是由于液氧煤油的特性引起的。采用补燃系统发动机的火箭,首飞成功是1965年,使用的推进剂是四氧化二氮和偏二甲肼;装液氧煤油补燃发动机的火箭首飞是在1985年,晚了20年。而且之后,又出现过发射场箭毁大故障。这些事实说明研制高压补燃液氧煤油发动机的技术难度委实很大。

张贵田院士及其同事从20世纪80年代初,就潜心于此领域的研究工作。1990年后我国引进液氧煤油补燃样机,他们经过十多年的刻苦耕耘,突破了一道又一道的技术难关,终于利用我国自己的资源,首次研制成功高压补燃液氧煤油发动机。这为我国大

火箭提供了强劲的支持,拓宽了中国航天发展的前景。

《高压补燃液氧煤油发动机》一书,深刻论述了补燃发动机设计原理及其结构的设计特点,大量介绍了“补燃”发动机组件结构设计的方法和诀窍。其中有些经验数据是多次试制、试验和试车的结果,可供设计者直接使用,更为可贵。可以说,该书集中体现了我国和当今世界“高压补燃液氧煤油发动机”的最新科技成果,有较高的学术水平和工程应用价值。相信本书的出版对从事液体火箭发动机研制的同行必有所裨益。

中国科学院院士

任新民

2004年8月

前 言

火箭发动机是火箭的心脏。作为运载火箭的核心技术,火箭发动机技术的先进程度是衡量一个国家空间技术发展水平的重要标志之一。人类自 20 世纪进入太空时代以来,先后研制出多种类型的液体火箭发动机。其中,高压补燃液氧煤油发动机代表了当今世界的领先水平。该发动机具有无毒、无污染、高性能、低成本和使用维护方便的优点,因而备受各航天大国关注。

当今世界主流的液体火箭发动机包括常规液体火箭发动机、先进的液氢液氧发动机和液氧煤油发动机。20 世纪 70 年代,苏联采用富氧燃气的补燃循环方式,解决了煤油冷却高压推力室的技术难题,成为首先突破高压补燃液氧煤油发动机技术的国家。美国在研制火箭发动机的道路上经过曲折和反复后于 20 世纪世纪末开始与俄罗斯合作研制高压补燃液氧煤油发动机。中国航天事业经过 40 年发展,共研制出 4 种 12 个型号的“长征”系列运载火箭,承担了国内外用户不同需求的发射任务。但是随着我国航天技术的发展,常规液体火箭发动机性能低、推进剂有毒的固有缺陷日益凸现出来。研制无毒、无污染的新型大推力液体火箭发动机成为中国航天事业发展的当务之急。20 世纪 80 年代末,航天推进技术研究院经过充分论证,在国家“863”专家委员会和原航天部的支持下,启动了液氧煤油发动机关键技术攻关。实践证明,中国发展液氧煤油发动机技术,是符合世界航天发展趋势和中国国情的。

2000 年中国政府发表了“航天白皮书”——《中国的航天》,明确提出了新一代大型运载火箭研制计划,有一关键技术就是研制新型高压补燃液氧煤油发动机。在航天推进技术研究院先期研究的基础上,液氧煤油发动机研制及其保障条件 2000 年获准立

项,转入工程研制。在各方面的共同努力下,液氧煤油发动机研制取得了重大进展,使我国成为继苏联之后第二个掌握高压补燃液氧煤油发动机技术的国家。

本书是作者及其同事们多年来研制高压补燃液氧煤油发动机的辛勤成果。全书共8章。

第1章对高压补燃液氧煤油发动机的系统组成、特点和关键技术做了简要论述,在回顾液氧煤油发动机发展历程的基础上对高压补燃发动机的发展趋势进行了展望。

第2章至第7章,以发动机设计为主线,对发动机系统、推力室、发生器、涡轮泵、自动器、总体设计及发动机试验进行了介绍。对发动机进行数学仿真,并且不断用实际试验结果完善仿真,以此来指导试验,这也是过去的书中少有的。很多的数据、图表和分析结论是高压补燃液氧煤油发动机研制的体会及经验,思想新颖、内容具体实用;同时,对国外同类型的发动机设计特点也做了介绍。

第8章重点对发动机模态分析理论、振动信号处理与分析进行了介绍。在过去同类著作中,这方面的知识和经验一般论述较少,这也正是本书的新颖之处。

需要指出的是,本书偏重于高压补燃液氧煤油发动机的设计技术实现,对试验和工艺技术方面的知识介绍相对较少,这是本书的不足。企盼今后有这方面的专著问世,把一些先进的试验技术和制造工艺介绍给读者。

作者在这里要特别感谢谭松林、刘站国、陈建华、黄智勇、李小明、樊根民、黄道琼和陈鸿麟等同事,他们在本书的完成过程中给予了大量帮助与支持。

特别感谢国防工业出版社、何鸿燊航天科技人才基金会给予的大力资助与支持。

由于作者水平有限,难免有错误之处,敬请读者批评指正。

作者

张贵田

2003年仲夏于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 组成与特点	2
1.3 关键技术	4
1.4 发展趋势	9
第 2 章 系统设计	12
2.1 概述	12
2.2 系统方案论证	12
2.3 系统方案设计	22
2.4 模型发动机简述	27
2.5 参数选择和参数平衡	29
2.6 发动机静态模型	37
2.7 静态计算程序简介	54
2.8 内外干扰因素分析	58
2.9 液氧煤油发动机调节特性	70
2.10 补燃发动机起动过程仿真	78
参考文献	119
第 3 章 推力室和燃气发生器	121
3.1 概述	121
3.2 推力室结构和工作方式	123
3.3 推力室主要参数	128
3.4 喷注器设计	139
3.5 燃烧室和喷管收敛段	152

3.6	推力室喷管造型	156
3.7	推力室身部	158
3.8	推力室冷却技术	161
3.9	燃烧不稳定性	182
3.10	推力室试验研究	191
3.11	推力室制造工艺与材料选择	202
3.12	燃气发生器结构与制造	208
3.13	富氧燃气发生器的工作过程	212
3.14	富氧燃气发生器试验研究	216
	参考文献	225
第4章	涡轮泵设计	227
4.1	概述	227
4.2	主涡轮泵的总体结构设计	227
4.3	主涡轮泵主要性能和结构参数的匹配 与确定	234
4.4	预压涡轮泵总体结构设计	248
4.5	涡轮设计	257
4.6	主泵的设计	286
4.7	动密封和静密封	304
4.8	重载高 DN 值滚动轴承	308
4.9	涡轮泵零部件加工的几种特殊方法和试验	310
	参考文献	313
第5章	液氧煤油发动机自动器	314
5.1	概述	314
5.2	影响自动器设计的主要因素	316
5.3	自动器的典型结构	318
5.4	密封结构设计	345
5.5	节流阀和调节器液流特性试验数据处理	359
5.6	流量调节器的静态特性	361
5.7	流量调节器的动态特性	366

5.8 自动器装配和试验	383
参考文献	394
第6章 总体设计	395
6.1 概述	395
6.2 发动机总体布局的基本原则	396
6.3 液氧煤油发动机的总体布局	397
6.4 液氧煤油补燃发动机总体布局的发展	407
6.5 CAD/CAM 技术在发动机总体布局中的应用	410
6.6 总装结构	413
6.7 发动机的检测	424
6.8 发动机重复试车处理	427
6.9 过滤器	429
6.10 摇摆软管	434
6.11 起动箱的工作原理、结构和性能	440
6.12 点火导管	442
6.13 换热器	444
6.14 发动机总体结构的设计准则	452
参考文献	474
第7章 发动机试验	476
7.1 概述	476
7.2 典型试验简介	476
7.3 涡轮泵组件试验	479
7.4 系统充填试验	489
7.5 发生器—主涡轮联动试验	496
7.6 发动机热试车	499
参考文献	504
第8章 结构动态特性分析	505
8.1 概述	505
8.2 常用分析方法	506
8.3 有限元法分析	510

8.4	试验模态分析的基本概念	519
8.5	激振和测量技术	523
8.6	模态参数识别	528
8.7	发动机常见结构的模态分析	531
8.8	结构动特性及模态分析技术应用	539
8.9	转子系统的临界转速计算	547
8.10	发动机试车信号数据处理	559
	参考文献	574

CONTENTS

CHAPTER I PREFACE	1
1.1 Introduction	1
1.2 Compositions and Characteristics	2
1.3 Key Technique	4
1.4 Development Trend	9
CHAPTER II DESIGN OF THE SYSTEM	12
2.1 Brief Introduction	12
2.2 Concept Argumentation of the System	12
2.3 Design of the System	22
2.4 Introduction to the Model Engine	27
2.5 Selection and Equilibrium of Parameters	29
2.6 Static Model of the Engine	37
2.7 The Static Computer Code	54
2.8 Analysis of the Internal and External Interference Factors	58
2.9 Throttling Characteristics of the LOX/Kerosene Engine	70
2.10 Simulation of the Engine Starting Process	78
References	119
CHAPTER III THRUST CHAMBER AND GAS GENERATOR	121
3.1 Brief Introduction	121
3.2 Structure and Operation Principle of the Thrust Chamber	123

3.3	Main Parameters and their Interrelations of the Thrust Chamber	128
3.4	Design of the Injector	139
3.5	Combustion Chamber and Nozzle Convergent Section	152
3.6	Shaping of the Thrust Chamber Nozzle	156
3.7	Thrust Chamber Body	158
3.8	Cooling Technique of the Thrust Chamber	161
3.9	Combustion Instability of the Chamber	182
3.10	Experimental Study on the Thrust Chamber	191
3.11	Manufacture Process and Material Choice of the Thrust Chamber	202
3.12	Structure and Manufacture of the Gas Generator ...	208
3.13	Working Process of the Oxidizer-rich Gas Generator	212
3.14	Experimental Study on the Oxidizer-rich Gas Generator	216
	References	225
CHAPTER IV	DESIGN OF THE TURBOPUMP	227
4.1	Brief Introduction	227
4.2	Structural Design of the Main Turbopump System ...	227
4.3	Matching and Determination of Main Performance Parameters and Structural Parameters for the Main Turbopump	234
4.4	Structural Design of the Prepump System	248
4.5	Design of the Turbine	257
4.6	Design of the Main Pump	286
4.7	Dynamic and Static Seals	304
4.8	Rolling Bearing with High DN Value	308
4.9	Several Special Manufacture Methods for the Turbopump Parts	310

References	313
CHAPTER V VALVES AND REGULATORS FOR THE	
LOX/KEROSENE ENGINE	314
5.1 Brief Introduction	314
5.2 Interference Factors for the Design of Valves and Regulators	316
5.3 Typical Structures of Valves and Regulators	318
5.4 Structural Design of Seals	345
5.5 Data Process for the Throttling Valve and Regulator	359
5.6 Static Characteristics of the Liquid Flow Regulator	361
5.7 Dynamic Characteristics of the Liquid Flow Regulator	366
5.8 Assembly and Test of Valves and Regulators	383
References	394
CHAPTER VI ASSEMBLAGE DESIGN	395
6.1 Brief Introduction	395
6.2 General Principle Of Configuration of the Engine	396
6.3 General Configuration of the LOX/Kerosene Engine	397
6.4 Evolution of General Configuration of the LOX/ Kerosene Staged Cycle Combustion Engine	407
6.5 Application of CAD/CAM to the Engine General Configuration	410
6.6 System Configuration	413
6.7 Checkout of the Engine	424
6.8 Restart of the Engine	427
6.9 Filter	429
6.10 Vibration Bellows	434