

液体火箭推进 增压输送系统

Liquid Rocket Propellant and
Pressurization Feed Systems

廖少英 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

液体火箭推进增压输送系统

Liquid Rocket Propellant and
Pressurization Feed Systems

廖少英 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

液体火箭推进增压输送系统 / 廖少英编著. —北京:
国防工业出版社, 2007. 4
ISBN 978-7-118-04911-4

I. 液... II. 廖... III. 液体推进剂火箭发动机 -
增压器 IV. V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 153967 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 15¼ 字数 395 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 52.00 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选出版。

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 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

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

前 言

当今,液体火箭推进系统已经成为现代运载火箭、航天器、空间探测和星际航行的重要推进装置。以前,人们往往把火箭推进系统称之为“发动机”或“发动机系统”,这是从火箭推进系统的主要功能是为飞行器提供推力来说。实际上,从最广泛使用的液体火箭推进系统来看,它是包含能量储存、推进剂加注、剩余控制、晃动抑制、增压输送、管理、排放和产生推力装置的庞大系统。它们涉及的理论和专业技术领域比较广,在工程设计上,其跨度也比较宽,涉及导弹、火箭总体设计中有关总体推进结构、构型、增压输送与火箭发动机等专业。因此,从专业技术范畴上,火箭推进系统实际是包含火箭发动机和推进剂增压输送系统两大部分,它们涉及的专业面也不尽相同。在火箭设计研制中,火箭发动机和增压输送系统实际也是分别独立、在不同单位或部门进行。通常,增压输送系统方案与火箭总体方案必须同时开展工作。自20世纪70年代末笔者提出“增压输送系统”概念以后,在专业领域内已形成广泛共识并得到应用。现在,增压输送系统已经成为火箭、飞行器设计、使用的几大子系统之一。

对于火箭发动机的设计、研制,包括燃烧室的热动力学和推进剂混合的研究试验应用,已经有系统的、大量的文献资料和书籍,而其对于推进剂供应、输送却仅有简要的描述。对于火箭总体设计中有关推进和增压输送系统方面,系统的论述、设计资料和文献很少或比较分散,而它们又是火箭和飞行器设计中一个很重要和复杂的部分,也是影响火箭、飞行器系统性能、安全和可靠性的很重要的课题。

在液体火箭总体设计中有关推进和增压输送系统包含哪些方

面,它们的内涵,如何选择和设计等,这些大的课题涉及学科面广泛而分散,而且,也是火箭总体设计研制工作中常常碰到的实际问题。笔者试图从系统基本原理、功能、类型、主要问题、设计、研究试验、应用成果和技术发展状态将这些课题汇编成:推进系统,增压输送系统及设计与应用,推进剂加注和剩余控制及晃动抑制,推进剂输送与管理及剩余推进剂排放,火箭纵向耦合振动(POGO)抑制,增压控制和气体热力计算,低温火箭喷泉效应和推进剂分层与增压计算,推进剂结构件和导管阀门附件等几方面,以供大家讨论研究参考。由于编著者水平有限,不足之处或错误请读者批评指正。若本书能对从事相关领域的科学技术工作者、院校师生的工作与学习有所帮助,这是对编著者的最大慰藉。

在本书编写中曾得到李相荣同志的指导和赵金才同志的帮助,成稿后,承蒙龙乐豪院士和施金苗同志的阅评。本书整理中也得到李军、张亮、周涛、洪刚、姚娜等同志的帮助,并得到上海航天技术研究院 805 研究所的积极支持,在此一并致谢。

编著者

2006年9月5日

目 录

第 1 章	绪论	1
第 2 章	火箭推进系统	7
2.1	火箭推进	7
2.2	推进系统类型	8
2.3	推进系统组成	9
2.4	推进系统选择	10
第 3 章	增压输送系统	13
3.1	系统功用	13
3.2	系统发展	13
3.3	系统类型	18
3.4	系统选择	21
3.5	推进剂箱	21
3.6	增压概论	28
3.7	输送系统	41
第 4 章	增压输送系统设计与应用	44
4.1	系统特性	44
4.2	系统方案设计	62
4.3	系统初步设计	69
4.4	系统技术设计与集成化	78
4.5	系统应用	79
第 5 章	推进剂加注和剩余控制及晃动抑制	99
5.1	推进剂加注容差	99
5.2	推进剂分配	102
5.3	推进剂加注方案	106

5.4	加注测量和控制	111
5.5	低温推进剂加注	113
5.6	推进剂剩余控制	116
5.7	推进剂晃动	136
第6章	推进剂输送与管理及剩余推进剂排放	153
6.1	输送管路推进剂流动	153
6.2	推进剂箱出口形状设计	169
6.3	失重状态下液体特性	173
6.4	大气层内高速机动飞行液体管理	198
6.5	弹性袋输送设计和试验	211
6.6	航天器非金属弹性袋贮箱设计与应用	243
6.7	交叉增压输送技术	254
6.8	空间剩余推进剂排放	265
第7章	火箭纵向耦合振动(POGO)抑制	280
7.1	纵向耦合振动概念及其影响	280
7.2	纵向耦合振动抑制	281
7.3	推进系统 POGO 冷流试验研究和应用	285
7.4	蓄压器设计	298
7.5	蓄压器研制试验	318
7.6	蓄压器与泵相互影响	324
第8章	增压控制和气体热力计算	325
8.1	推进剂箱气枕增压控制	325
8.2	推进剂箱气枕	328
8.3	增压气体热力计算	335
8.4	增压气体利用	362
第9章	低温火箭“喷泉”效应和推进剂分层与增压计算	365
9.1	低温推进剂火箭喷泉效应及其抑制	365
9.2	低温推进剂分层分析和试验	377
9.3	低温推进剂增压计算	387
第10章	推进剂结构件与导管阀门附件	409

10.1	推进剂结构件	409
10.2	液位指示	411
10.3	导管	418
10.4	阀门附件	426
参考文献		465

Contents

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Rocket Propulsion System	7
2.1 Rocket propulsion	7
2.2 Propulsion system type	8
2.3 Propulsion system form	9
2.4 Propulsion system selection	10
Chapter 3 Pressurization Feed System	13
3.1 System function	13
3.2 System development	13
3.3 System type	18
3.4 System selection	21
3.5 Propellant tank	21
3.6 Pressurization introduction	28
3.7 Feed system	41
Chapter 4 Pressurization Feed System Design and Application	44
4.1 System characteristic	44
4.2 System scheme design	62
4.3 System preliminary design	69
4.4 System technical design and integration	78
4.5 System application	79
Chapter 5 Propellant Loading and Outage Control and Slosh Restraint	99
5.1 Propellant loading tolerances	99

5.2	Propellant inventory	102
5.3	Propellant loading concept	106
5.4	Loading measurement and control	111
5.5	Cryogenic loading	113
5.6	Propellant outage control	116
5.7	Propellant slosh restraint	136
Chapter 6 Propellant Feed and Management and Residual		
	Propellant Dumping	153
6.1	Feedline propellant flow	153
6.2	Propellant tank outlet design	169
6.3	Zero-gravity fluid characteristic	173
6.4	Liquid propellant management for the mobile flight in the atmospheric layer	198
6.5	Flexible bladder feed design and test	211
6.6	Nonmetallic flexible bladder design and application for the spacecraft	243
6.7	Cross-pressurization feed technology	254
6.8	Dumping of residual propellant in space	265
Chapter 7 Suppression of Longitudinal Coupling Vibration		
	(POGO) on the Rockets	280
7.1	Longitudinal coupling vibration and influence	280
7.2	Suppression of longitudinal coupling vibration	281
7.3	Experimental study and application of (POGO) vibration in the propulsion system	285
7.4	Accumulator design	298
7.5	Development test of accumulator	318
7.6	Interaction of the accumulator and pump	324
Chapter 8 Pressurization Control and Heated Account		
	of Gas	325
8.1	Pressurization control of the propellant tank ullage ...	325

8.2	Propellant tank ullage	328
8.3	Heated account of the pressurization gas	335
8.4	Pressurizing gas usage	362
Chapter 9 "Geysering" Effect of the Cryogenic Rocket		
and Propellant Stratification and pressurization		
	account	365
9.1	Geysering effect of the cryogenic and suppression	365
9.2	Cryogenic propellant stratification analysis and test	377
9.3	Cryogenic propellant pressurization account	378
Chapter 10 Propellant Hardware and Pipe Valve		
	Components	409
10.1	Propellant hardware	409
10.2	Level sensing	411
10.3	Pipe	418
10.4	Valve components	426
Main References		466

第1章 绪论

火箭推进系统的功能是为发射一定的有效载荷到达预定的目标提供必要的推力。通常,推进系统由一台或多台发动机、推进剂贮箱和增压输送系统组成,如图1-1所示。

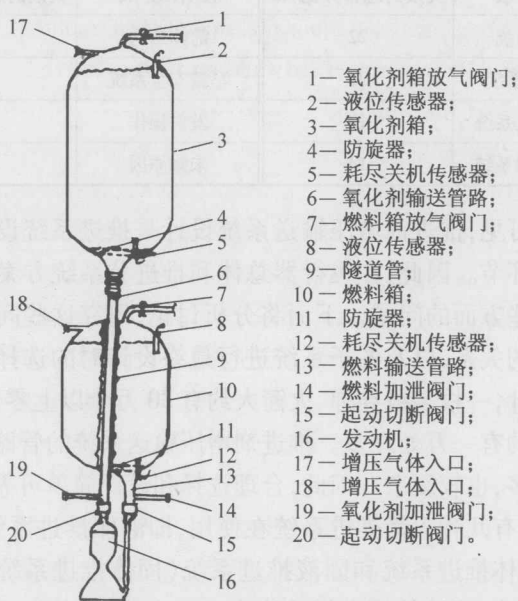


图1-1 液体推进系统示意图

火箭推进系统是一个为飞行器贮存推进剂或物质,以便经过转换从飞行器喷出物质产生定向的推力,推动飞行器飞行的能量输送、转换装置。该推力的大小直接与重量流量和喷射物质的速度成正比。因此,为获得更大的推力,必须增大流量或提高喷出物

质的出口速度。这个关系就是通常定义的动量,即质量乘以速度。因为任何隔绝系统的全部动量在大小和方向上是定值,随着物质的喷出给予飞行器相等而方向相反的动量。

推进系统是影响火箭、飞行器性能、安全和可靠性的一个重要分系统。据国外资料统计,到20世纪70年代,美国发射了上千枚中远程导弹及运载火箭,其中由于发动机及增压输送系统故障造成飞行失败的均占相当大的比例。美国导弹、火箭发射失败的故障统计如表1-1所列。

表1-1 美国导弹、火箭发射失败各系统故障所占的百分比

技术领域	失败的总百分比/%	技术领域	失败的总百分比/%
发动机系统	22	箭体结构	7
增压输送系统	28	军械安全系统	7
电气—液压系统	17	发射操作	2
制导和控制系统	14	未知原因	3

由此可见,推进剂增压输送系统设计是推进系统设计的一个很重要的环节。因此,在飞行器总体和推进分系统方案设计时必然涉及这些方面的问题。下面将分析讨论、研究这些问题并论证它们之间的关系,以及各子系统进行最终设计时的选择和结构型式。据统计,一枚多级导弹、火箭大约有30万个以上零件,而可能发生故障的有一万处之多。推进剂增压输送系统的管路和阀门附件一般较多,也较复杂。因此,合理选择和设计简单可靠是关键。

目前,有几种火箭推进系统在使用,即液体推进系统、固体推进系统、气体推进系统和固液推进系统(固体推进系统不在本书讨论)。其中,在液体推进剂系统中又分为两类:单组元推进剂系统和双组元推进剂系统。单组元推进剂系统在简单性上优于双组元推进剂系统。但是,到目前为止,在性能上与双组元推进剂系统比较起来较低,单组元推进剂系统主要应用于小推力系统。因此,在本书的讨论中着重在双组元推进剂系统。但是,对于推进剂输送机理、容器设备和增压输送系统方面对两个系统均适用。

液体推进系统一般又有泵压式和挤压式推进系统两大类。泵压式推进系统是从贮箱输送推进剂进入发动机泵,再由涡轮驱动泵输送推进剂进入燃烧室;而挤压式推进系统是使用贮箱压力直接挤压输送推进剂进入燃烧室。通常,挤压式推进系统在较小的火箭、航天器上使用。

飞行器的射程或航程正比于火箭的熄火点速度,而熄火点速度与比冲和质量比的自然对数成正比,即

$$R \sim V_{bo} = I_{sp} g \ln\left(\frac{W_o}{W_e}\right) - g t + V_o \quad (1-1)$$

设计推进系统获得最佳的比冲和质量比很不容易。推进系统设计的目的是 W_o/W_e 尽可能大。总质量 W_o 是所有非消耗系统组件的质量加上可用推进剂的质量组成,熄火点质量 W_e 是起飞质量减去消耗的推进剂。一旦起飞总质量确定,为获得最大限度的质量比,唯一的途径是消耗尽可能多的推进剂。换句话说,把无用推进剂减少到最低限度。自然,必须在最大性能的混合比下消耗推进剂;否则,实际会使比冲性能不好。现代火箭的技术水平是研制火箭的质量比争取在 10~20 范围内,提高这个质量比率就涉及火箭总体、增压输送系统设计和推进剂加注与剩余量控制。

发动机是在一定的混合比下进行设计的。实际上,这个比率从设计发动机到实际发动机可能变化 $\pm 30\%$ 之多。发动机通常是在发动机制造厂的试验站试车,从那里可以得到发动机性能的实际混合比。如果飞行加速度不影响发动机的混合比,为最小的推进剂剩余,简单地加注飞行器到此混合比就可以。然而,实际飞行影响混合比,从加注到飞行中外界因素(如空气动力加热)会改变一部分推进剂的密度,加速度改变泵或燃烧室入口压力,这些均使发动机的工作混合比改变。考虑这些影响,可以得到接近于实际的混合比。若有充足的资料(数据)可利用来确定这些要求精确的量值,那么,通常采用校准系统和适当地加注就足够,这是在一些导弹、火箭系统中使用的方法。如果这些量值必需的精度不知