

# 构建基础研究平台， 推动液体动力技术创新发展

李 斌

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 阐述了液体动力技术基础研究的内涵, 从液体动力装置的技术复杂性和严酷的工作环境两个层面对基础研究的重要性进行了论述。探讨了液体动力技术基础研究两大领域、6 个技术分支和 23 个具体研究方向的主要研究内容。简要介绍了目前所拥有的研究能力和已取得的部分研究成果, 提出了未来发展思路 and 措施建议。

**关键词:** 液体动力技术; 基础研究; 发展思路

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0001-09

## Establishment of fundamental research platform for promoting innovative development of liquid propulsion technology

LI Bin

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The connotation of the fundamental research on technology is elaborated. in rocket engine. The importance of the fundamental research are discussed in two aspects of technical complexity and severe operating environment of the liquid propulsion system. The two major domains, six technical branches and main contents in twenty-three specific research directions of the fundamental research on the liquid propulsion technology are investigated. The currently-possessed research capacity, the test facilities and the acquired partial achievements are introduced briefly. The development ideas, measures and suggestions in the future fundamental research of liquid rocket engine in Xi'an Aerospace Propulsion Institute are proposed.

**Keywords:** liquid propulsion technology; fundamental research; development idea

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-01-27

作者简介: 李斌 (1969—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机

## 0 引言

液体动力技术基础研究是探索液体动力系统工作时所发生的流动、传热及燃烧等过程的基本规律和掌握发动机结构动力学特性、静力学特性及环境适应性的研究工作。它涵盖液体动力系统热过程和液体动力系统结构力学与环境技术两个领域。其研究内容涉及液体推进剂喷雾燃烧过程、工质与结构间复杂传热过程、液体推进剂物理化学特性、流体流动过程、发动机系统动力学、结构动力学特性、结构静力学特性及发动机力学环境适应性等方面。

航天液体动力系统（主要指液体火箭发动机）具有极高的能量释放密度，工作在高温和高压条件下，承受着高强度热力载荷。如我国新一代大推力液氧煤油发动机，其燃烧室压力为 18 MPa，燃气温度 3 500 K 以上，发动机结构材料承受高温和高压共同作用<sup>[1]</sup>；其推进剂燃烧过程极其复杂，存在各种类型、不同时间与空间尺度的物理和化学反应过程；在燃烧室中，尤其是喷注器附近推进剂浓度、温度梯度很大，流场结构非常复杂；燃烧室内极高的能量释放密度使得燃烧不稳定性易于激发，一旦发生燃烧不稳定性，可能导致发动机机械振动加剧和热负荷增加，使发动机部件遭到破坏，尤其在发生切向高频燃烧不稳定时，可在不到 1 s 时间内将推力室烧毁。在小推力姿轨控发动机中，采用单壁辐射冷却的推力室壁面温度高达 1 700 K，对结构材料的耐高温性能提出了极高要求<sup>[2]</sup>。

液体动力系统既是运载火箭的动力源，也是全箭主要的激励源。它使发动机自身和航天运载器在发射和飞行中经受复杂、严酷的力学环境，包括推力产生的加速度环境，发动机工作产生的振动环境，点火、关机产生的瞬态冲击环境及喷流噪声通过结构传递的高频随机振动环境等<sup>[3]</sup>。大量地面试车和飞行统计数据表明，对这些力学环境适应性验证不充分是造成发动机和航天运载器故障，甚至导致任务完全失败的重要原因之一<sup>[4]</sup>。

上述特点表明，液体动力系统是一个汇集各

领域技术的高度复杂的工程体系。高度的复杂性、极端恶劣的工作条件和苛刻的性能及可靠性要求，决定了液体动力系统的设计必须建立在成熟的设计理论和规范的设计准则基础之上。要建立这些理论和准则，深入研究发动机内流动、燃烧及传热过程，把握高转速、强振动及高低温条件下发动机结构力学特性是重要前提。只有深入开展热过程技术研究，把握高度复杂的液体推进剂燃烧过程，才能很好地组织燃烧以确保发动机具有高的燃烧效率，满足飞行器对动力系统的性能要求；才能找到有效的结构措施以抑制和消除不稳定燃烧现象；才能保证推进剂供应系统的流动特性以及整个发动机系统稳定性；才能采取合理、高效的冷却措施以确保发动机结构安全。只有深入开展结构力学和环境技术基础研究，对发动机及其附属产品进行大量的力学环境仿真及试验工作，充分暴露产品的薄弱环节并加以改进，才能使发动机适应各种复杂恶劣的工作环境，提高可靠性，满足航天发射复杂环境以及武器型号灵活、机动、全天候的要求。

## 1 液体动力技术基础研究的主要方向

液体动力技术基础研究属于应用基础研究范畴，应紧扣工程实际，以解决型号共性、关键技术问题为出发点和落脚点。根据我国液体动力技术发展的具体情况，本文将液体动力技术基础研究划分为两大领域、6 个技术分支及 23 个具体研究方向，如图 1 所示。

### 1.1 超临界条件下喷雾燃烧过程

现代液体火箭发动机推力室室压呈逐步提高的趋势。大推力发动机推力室室压已达到 25 MPa，其燃气发生器室压已达 50 MPa<sup>[1]</sup>，高压姿轨控发动机室压已达到 10 MPa 以上。超临界高压燃烧过程成为燃烧装置技术的重要研究内容，具体包括：超临界条件下推进剂燃烧机理及化学动力学模型，液滴高压蒸发理论与模型，多次起动点火技术，起动、关机及大范围工况调节过程中推力室/发生器燃烧特性，同轴式气液喷嘴和液液喷嘴燃烧特性，大流量同轴式喷嘴稠密雾场光学测量技术，以及喷注器缩比试验技术等。

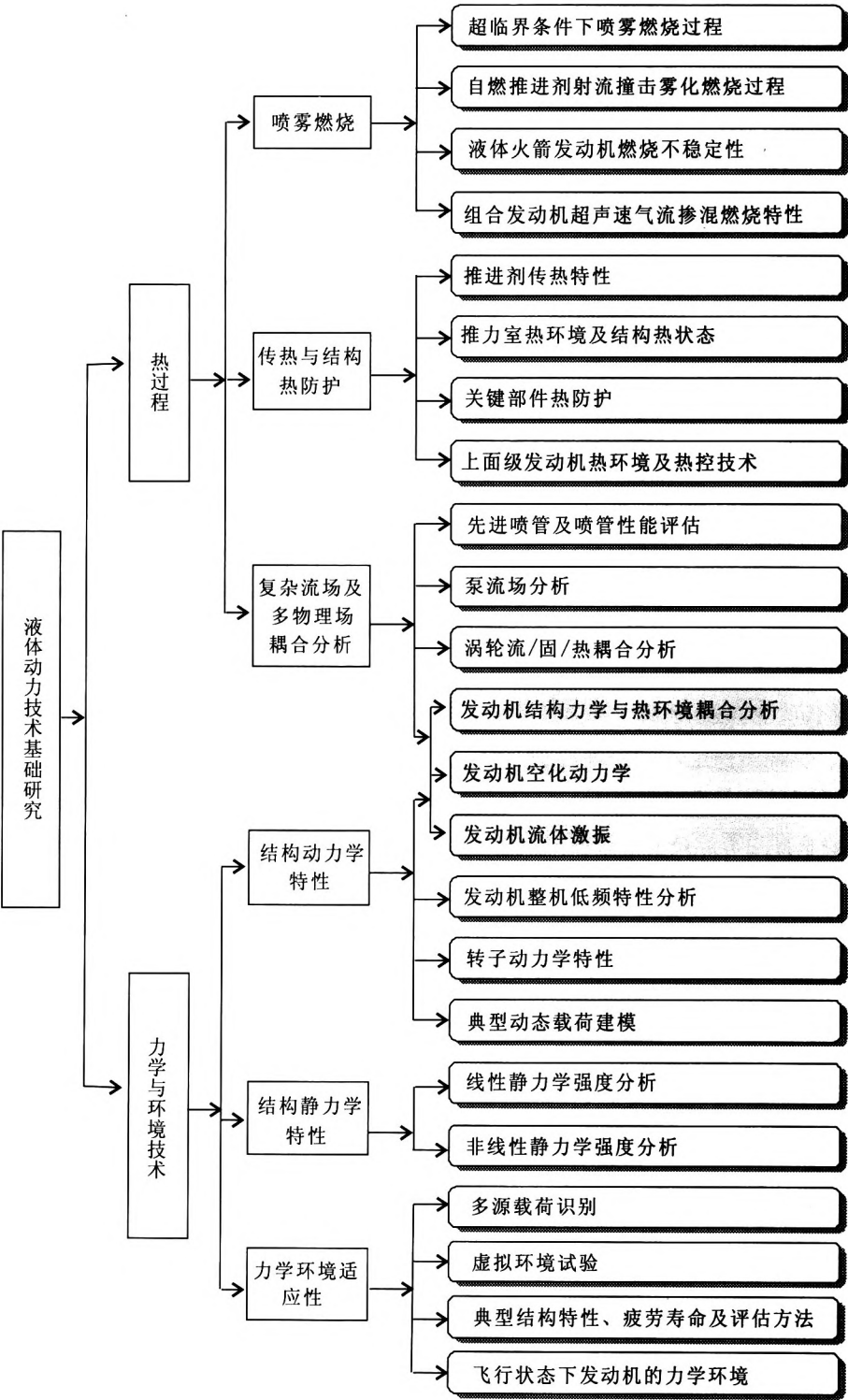


图 1 液体动力技术基础研究的主要研究方向

Fig. 1 Main research directions of fundamental research on liquid propulsion technology

1.2 自燃推进剂射流雾化燃烧过程

自燃推进剂射流撞击雾化燃烧过程的研究历

史较为久远，在早期研究的基础上，射流撞击雾化燃烧特性研究持续进行并不断深入，先进光学

测量技术和 CFD 技术的应用,为该领域的研究带来了新的活力。该领域研究内容主要包括:自燃推进剂着火机理研究,撞击式和层板式喷注单元雾化混合特性,栓式喷注器雾化混合特性,喷注器及其喷注单元喷雾燃烧过程数值模拟,喷注器及其单喷注单元热试研究,栓式喷注器喷雾燃烧过程数值模拟,以及射流撞击雾化燃烧过程光学测量技术等方面。

### 1.3 液体火箭发动机燃烧不稳定性

液体火箭发动机燃烧不稳定性通常表现为燃烧室压力发生周期性振荡。对液体火箭发动机燃烧高频不稳定性问题的研究和发动机研制的工程实践表明,隔板、液相分区和声腔是抑制燃烧高频不稳定性的有效手段。目前液体火箭发动机燃烧不稳定性问题尚未获得根本解决,特别是高频燃烧不稳定性问题。燃烧不稳定性问题仍是液体动力技术基础研究的核心内容之一。具体研究内容包括:燃烧不稳定性的激励机理、室压振荡的传播及阻尼机制、燃烧不稳定性的控制方法及发动机燃烧不稳定性试验评估方法等方面<sup>[5-7]</sup>。为掌握激励机理,需要掌握喷雾燃烧各子过程(喷射、雾化、蒸发、混合及化学反应)对压力振荡的响应特性,建立各子过程的仿真模型和分析方法,掌握喷雾燃烧过程的光学诊断方法、喷注单元模拟实验方法和全尺寸喷注器模拟试验方法。该领域的研究对试验设施也提出了很高的要求,不仅需要建立稳态条件下的试验观测手段,还需要建立非稳态特别是压力振荡条件下的试验研究手段。

### 1.4 组合发动机超声速气流掺混燃烧特性

航天液体动力系统除了液体火箭发动机之外,还包含其他类型的液体动力装置,如冲压发动机和吸气式组合循环发动机等。组合发动机超声速气流掺混燃烧特性是该类发动机基础研究的主要内容之一。具体研究内容包括:超燃及组合发动机火焰稳定、传播、流动平衡及高效稳定燃烧技术,大范围变工况气流中火焰持续稳定及传播机理,异质超声速流掺混与流动平衡机理,多模态高效燃烧组织技术及燃烧性能评估方法,凹腔强化混合机制及激波-边界层作用的强化混合机制等。

### 1.5 推进剂传热特性

推进剂传热特性也是液体动力技术基础研究中具有较长研究历史的一个研究课题,目前各国仍在持续进行深入研究。具体研究内容包括:完善推进剂电传热试验研究方法,建立典型推进剂传热特性、热物性、热裂解特性及结焦特性数据库,总结典型推进剂传热准则方程,开发推进剂传热特性分析软件,超临界条件下煤油传热特性,传热强化(表面粗糙度强化等)技术,新型热结构传热特性评估,吸热型碳氢燃料与材料相互作用规律及推进剂传热特性实验研究方法等。

### 1.6 推力室热环境及结构热状态

推力室热环境及结构热状态主要研究内容包括:喷注器面热环境、冷却液膜流动与传热特性、不同形式射流撞壁液膜形成过程、燃烧室传热周向不均匀性、高深宽比冷却通道流动与传热特性、推力室强化换热机理与分析模型及辐射换热模型和算法。为很好完成这些研究任务,搭建专门的推力室传热特性实验研究平台,构建模拟真实工况条件下推力室冷却通道热边界条件的实验台尤为重要。因此,研究内容还应当包括:推力室热环境及结构热状态实验研究方法和推力室结构热状态的测量方法等方面的内容。

### 1.7 关键部件热防护

液体火箭发动机中,除推力室外,还有一些重要部件需要很好解决热防护问题,特别是对于高压补燃发动机,燃气路很多部件需要可靠冷却。本方向具体研究内容包括:高压燃气摇摆软管热防护、S型摇摆软管内超临界冷却介质流动和换热特性数值模拟方法、高压燃气通道结构热状态三维仿真分析、高压富氧燃气通道材料着火特性、富氧燃气夹带金属颗粒对结构安全性的影响、富氧燃气中的涡轮叶片(包括动叶片和静叶片)着火条件、涡轮壳体冷却系统分析方法及端面密封材料的冷热冲击换热特性等。

### 1.8 上面级发动机热环境及热控技术

上面级发动机热环境及热控技术主要研究内容包括:上面级发动机羽流对流和辐射换热特性、发动机部件空间环境热辐射特性地面模拟试验技术、多机并联发动机地面及低空飞行状态喷



流排气热影响、上面级发动机气动热影响、上面级发动机在轨飞行期间结构热状态、发动机常用材料表面辐射特性、发动机热控方案地面验证方法及热控系统设计方法等。

### 1.9 先进喷管及喷管性能评估

先进喷管及喷管性能评估主要研究内容包括: 喷管性能评估理论模型、大面积比高空喷管燃气流动特性、新型喷管型面设计技术(如可延伸喷管技术和缝隙式喷管技术等)、喷管数据库、喷管型面优化方法、喷管性能实验研究方法及差动喷管实验技术等。

### 1.10 泵流场分析

泵流场分析主要研究内容包括: 离心泵诱导轮和离心轮流场特性、密封间隙流量-流阻特性、低温对离心泵性能影响及叶轮结构参数和级间过渡流道对泵性能的影响等。

### 1.11 涡轮流/固/热耦合分析

涡轮流/固/热耦合分析主要研究内容包括: 涡轮流场仿真与性能分析、涡轮盘结构热状态、涡轮盘结构力学特性、涡轮流/固/热耦合仿真分析、涡轮性能优化方法、涡轮叶片附面层流态变化、涡轮叶片附面层与激波相互干涉的物理机制、涡轮叶片全三维流场流动图谱、涡轮叶栅性能数据库、涡轮吹风试验技术、超音速单级涡轮试验技术、涡轮内流场测量技术及涡轮叶片表面温度测量技术等。

### 1.12 发动机结构力学与热环境耦合分析

重点针对二级发动机和上面级发动机展开研究, 主要研究内容包括: 发动机整机力和热环境预示、力热环境耦合作用下发动机结构破坏机理、发动机力和热环境适应性增强机理及其实现方法等方面。该方向的研究有助于提高现役液体动力系统对力学与热环境的适应性, 弥补二级发动机力热环境难以在地面进行充分考核和模拟的不足, 并对新型号研制预先考虑二级力热环境影响提供依据。

### 1.13 发动机空化动力学

针对发动机中出现不稳定空化引起的诱导轮叶片断裂、穿透、振动增大以及空化导致发动机结构破坏和诱发箭体 POGO 振动等问题, 开展空

化动力学的机理和变化规律及影响因素、高速复杂空化内流场的数值仿真方法、涡轮泵空化不稳定性的主动控制技术、高速诱导轮汽蚀动特性可视化试验研究、诱导轮汽蚀振动抑制的机理及诱导轮气液两相流场仿真等方面的研究。

### 1.14 发动机流体激振

发动机流体激振主要研究包括: 超低温环境下动态小间隙环流的流体激振机理、超高扬程泵内主流与旁流耦合产生的压力脉动机理、复杂流体激励作用下涡轮泵非线性振动特性及抑制方法。这些研究有助于控制发动机振动量级。

### 1.15 发动机整机低频特性分析

发动机整机低频特性分析主要研究内容包括: 基于传递函数的发动机频率特性分析方法、重要组件动力学传递模型、重要组件模态计算、自动器调节元件的谐振频率分析、气路动态过程对发动机系统特性的影响、泵动特性参数仿真分析与实验测量方法及发动机稳定性边界等。

### 1.16 转子动力学特性

转子动力学特性主要研究内容包括: 高速转子临界转速识别、高速转子不平衡响应分析、流体激振和旋转机械减振、柔性转子高速动平衡技术及转子结构裕度研究(超转试验)。

### 1.17 典型动态载荷建模

典型动态载荷建模研究内容包括: 复杂流场流固耦合模拟、燃烧激励载荷建模研究及液路低频激励载荷模拟。

### 1.18 线性静力学强度分析

线性静力学强度分析研究内容包括: 机架和常平座强度与刚度分析及结构优化、总装直属组件强度分析与结构优化、关键热端组件(如推力室、发生器及涡轮泵)强度计算与结构优化等。

### 1.19 非线性静力学强度分析

非线性静力学强度分析研究内容包括: 大推力摇摆软管仿真计算、推力室和发生器总承载能力分析、换热器极限承载能力分析、各种密封结构计算及发动机推力线偏斜分析。

### 1.20 多源载荷识别

多源载荷识别研究内容包括: 发动机子结构分析方法、多源载荷验证方法及多源载荷模型等。

1.21 典型结构特性、疲劳寿命及评估方法

典型结构特性、疲劳寿命及评估方法主要研究内容包括：复合材料等新材料在高温和强振动等环境下的力学行为，航天材料各种加工工艺下结构的力学特性和动态疲劳特性，中、高频动态结构可靠性评估方法，复杂结构（各种连接方式）动态阻尼特性及失效模式，航天常用材料极限环境下（如高温下、腐蚀环境下及长时间贮存）的力学特性，动密封的动态特性以及对转子稳定性的影响研究。这项研究主要针对型号研制中出现的复杂环境下动态失效无法评估的问题以及新型发动机研制中一些对力学环境非常敏感的环节的设计准则。

1.22 虚拟环境试验

虚拟环境试验主要研究内容包括：振动和声学等虚拟试验平台、发动机系统级仿真模型的准确建模及模型修正、虚拟环境试验的闭环控制技术

1.23 飞行状态下发动机的力学环境

飞行状态下发动机的力学环境主要研究内容包括：飞行状态下一、二级发动机整机力学环境预示方法，飞行状态下发动机关键部、组件力学环境预示方法，模拟飞行状态二级发动机整机力学环境试验技术及模拟飞行载荷条件关键部、组件力学环境试验技术。

2 研究成果与贡献

我国航天液体动力技术经过 50 余年的发展，从无到有、不断壮大，已形成一套研究、设计、生产和试验体系，建立了一定规模的液体动力技术基础研究条件，取得了重要研究成果。

2.1 研究条件

我国液体动力技术基础研究条件主要集中于航天推进技术研究院，包括热过程研究条件和发动机结构力学与环境技术研究条件，如图 2 和图 3 所示。图 4 和图 5 中给出了部分设备照片。

2.2 成果与贡献

在液体动力技术发展过程中，基础研究所取得的成果与贡献可以概括为 4 个方面：创建基础理论与设计准则，支撑关键技术攻关，提高产品质量与可靠性及推动液体动力技术创新发展<sup>[8]</sup>。

西安航天动力研究所先后开展了液体推进剂物理化学性质、液体推进剂喷雾燃烧特性、燃烧稳定性、发动机传热特性及发动机结构力学特性等领域的基础研究，奠定了我国液体火箭发动机设计的理论基础。在此基础上开发出推力室热力气动计算、最大推力喷管造型、推力室传热计算、燃烧过程分析及喷雾过程仿真分析等一系列具有自主知识产权的计算软件，并紧密结合工程研制经验制定了相关组件的设计准则和设计规范。

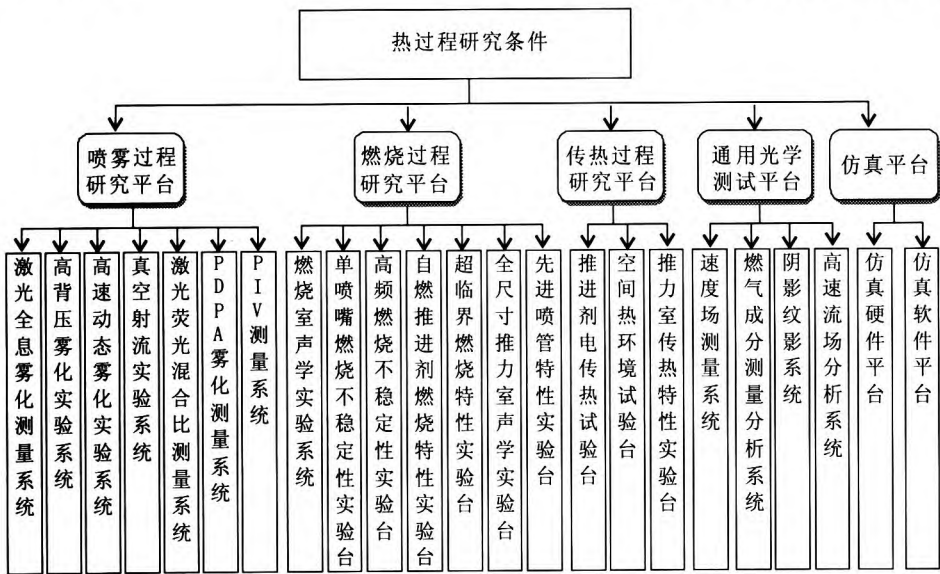


图 2 液体动力系统热过程研究条件

Fig. 2 Capabilities for thermal process research on liquid propulsion technology

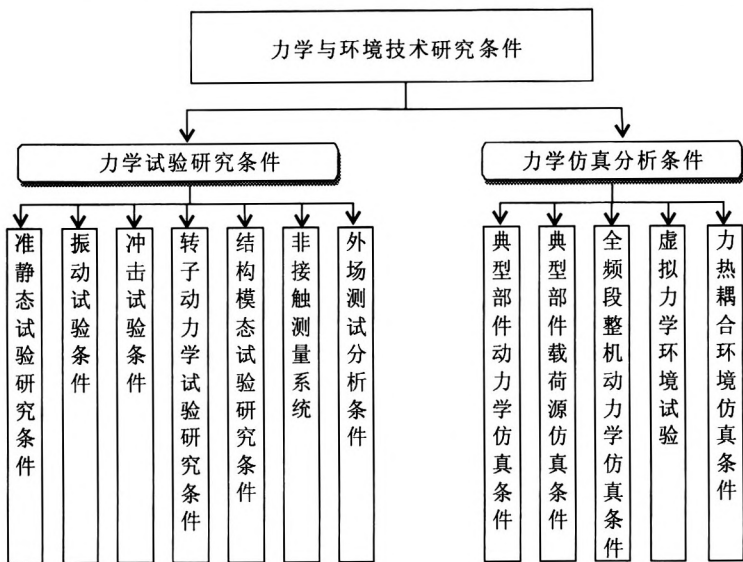


图 3 液体动力系统力学与环境技术研究条件

Fig. 3 Capabilities needed for mechanics and environmental research of liquid propulsion system

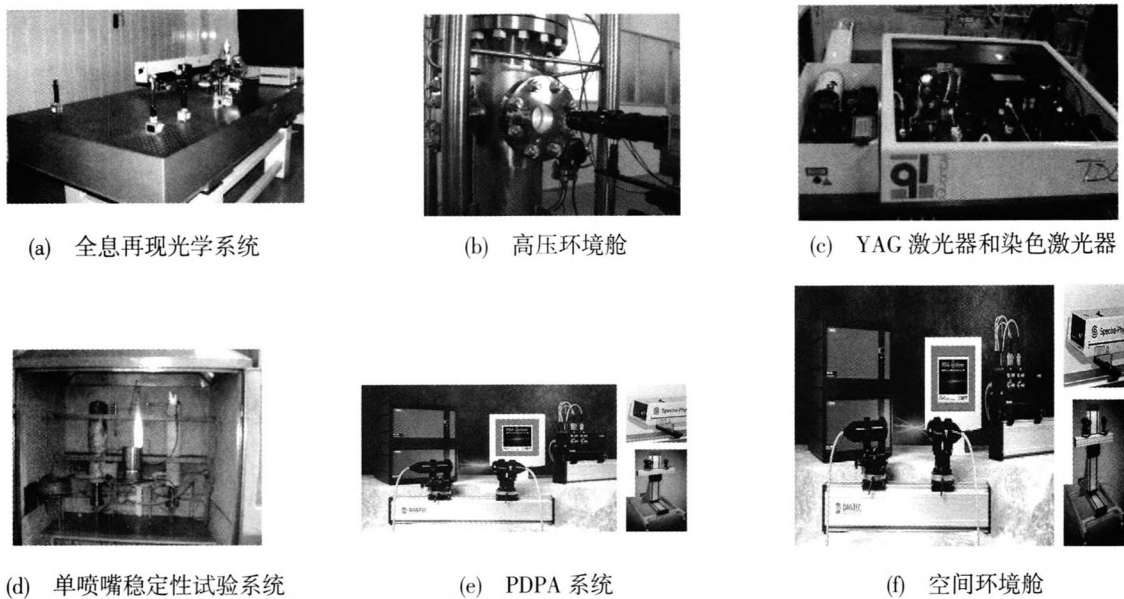
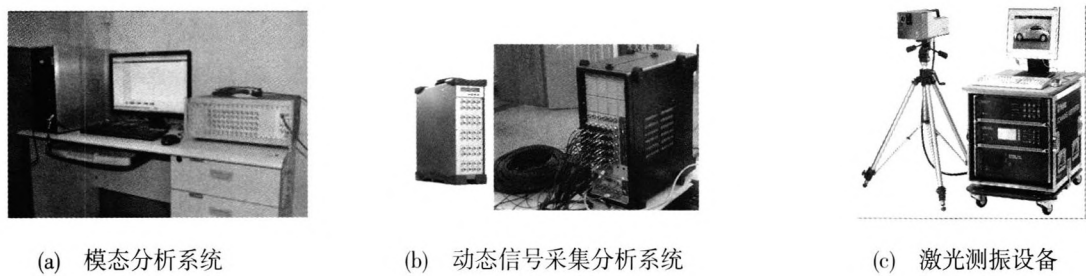


图 4 热过程研究部分设备

Fig. 4 Some equipments for thermal process research



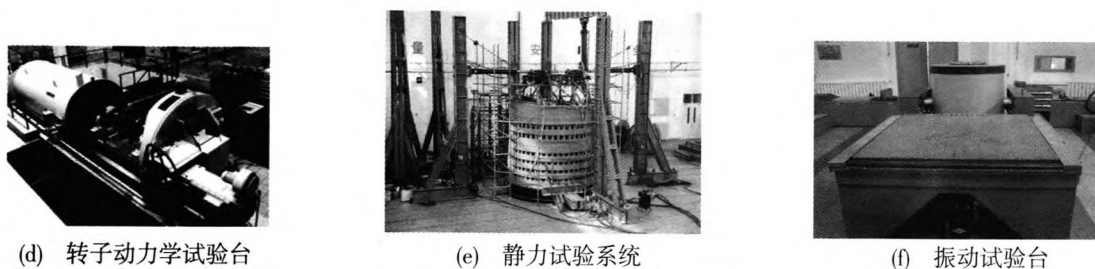


图5 力学与环境技术研究部分设备

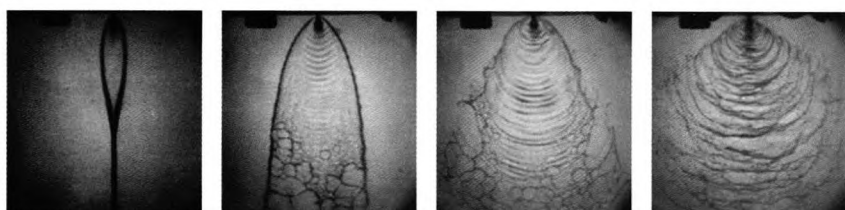
Fig. 5 Some equipments for mechanics and environmental technology research

基础研究在型号研制关键技术攻关中做出了重要贡献。早期型号研制中,开展了燃烧不稳定性攻关,采用隔板+液相分区等措施,消除了不稳定燃烧现象;某型高空发动机研制中通过对  $N_2O_4$  冷却特性进行试验研究和理论分析,在沸腾换热理论上实现了突破,成功用  $N_2O_4$  对推力室进行冷却。液氧煤油发动机研制中,对冲压成型工艺数值仿真,准确预测了应力变化、危险点和失稳模式,突破了关键工艺难点<sup>[8]</sup>。在高性能喷注器设计、液膜冷却性能及推力室耐高温新型材料方面所进行的基础研究,为高比冲双组元液体远地点发动机研制关键技术的突破做出了重要贡献。

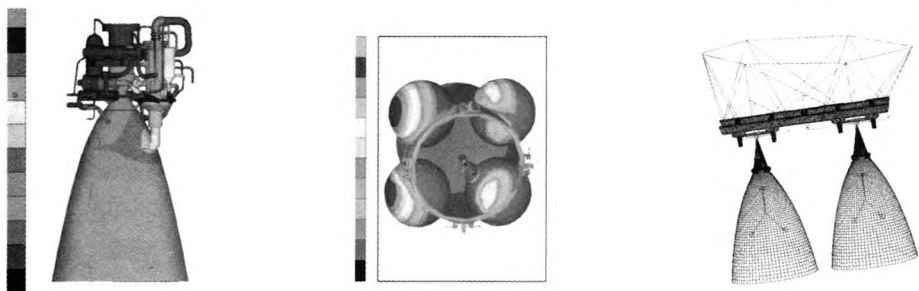
基础研究对于提高各型发动机的质量和可靠性发挥了重要作用。某型火箭主发动机研制中,通过结构特性分析和模态试验研究,解决了启动

阀管路在试车中多次断裂问题。某高空发动机研制中,通过开展二次点火前两相流动特性研究,成功解决高空二次点火相关技术问题,确保了发动机工作可靠性。液氧煤油发动机研制中经过大量模态试验,辨识出了发动机的低频动态特性。据此经改进设计,使单机助推发动机和双机助推发动机均达到总体规定的一阶频率要求,为保障新型运载火箭的可靠性做出了贡献<sup>[8]</sup>。

液氧煤油发动机、氢氧发动机、月球着陆探测器发动机、亚燃冲压发动机及电推进发动机等型号研制中集中展示了基础研究引领技术创新的作用<sup>[8]</sup>。在月球着陆探测器 7 500 N 发动机研制过程中,开展了针栓式喷注器喷雾燃烧特性、月球着陆探测器热防护技术及折损喷管仿真等基础研究工作,推动了我国大变比变推力发动机技术发展。图 6 给出了部分研究成果图片。



(a) 闭合边缘模式 ( $Re=366$ ) (b) 液膜张开模式 ( $Re=843$ ) (c) 边缘敞开模式 ( $Re=1\ 585$ ) (d) 周期性液丝模式 ( $Re=5\ 998$ )



(e) 发动机高空关机滑行段热分析 (f) 发动机贮箱飞行热环境分析 (g) 双机低频动特性仿真



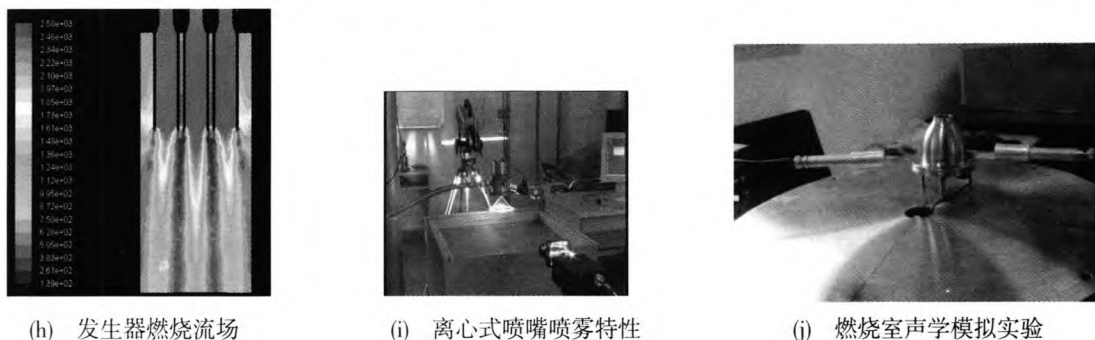


图6 部分研究成果图片

Fig. 6 Some diagrams and pictures of research achievements

### 3 发展思路

当前航天液体动力技术面临紧迫发展态势。在基础研究领域,我国与世界先进水平有一定差距,存在着研究深度、广度不够,资金投入力度不足,统筹规划不足(未能充分发挥整体优势)等问题。为实现由航天大国向航天强国转变,动力技术必须赶超或达到航天强国的水平,为此,应加强基础研究及先进研发体系建设,对涉及航天液体动力重大基础技术、共性技术、前沿技术和核心关键技术进行研究。必须尽快健全完善研究平台和保障条件,探索出适合我国国情的自主创新模式,从根本上解决制约我国航天液体动力技术发展的体系、规划、基础及保障等问题。我们提出未来发展的思路是:构建基础研究平台,形成基础研究合力;密切结合型号研制,提供有力技术支撑;形成完备规范体系,促进研发模式转变。根据上述发展思路,提出几点建议。

#### 3.1 建设液体火箭发动机热过程科技重点实验室

依托重点实验室“开放、流动、联合、竞争”的运行模式,构建更加符合基本规律的液体火箭发动机热过程基础研究新模式,形成面向行业、面向国内、面向国际三个层次的开放机制。重点实验室将以“搭建交流平台,夯实理论基础;推进预先研究,引领技术创新”为指导,重点开展基础性、创新性和重大关键技术的预先研究和基础理论应用研究。

#### 3.2 加强液体火箭发动机力学与环境技术研究

依托成熟型号,梳理专业问题,总结研制经验,构建液体火箭发动机力学与环境研究规范。通过虚拟试验和新试验技术,促进液体火箭发动

机力学与环境技术研究平台的不断发展。建立发动机整机力学环境模型,开展专项技术应用研究,预示各种力学与环境下的结构响应,支撑型号全寿命结构可靠性设计、试验及评估水平的提高。

#### 3.3 密切产、学、研结合,发挥整体科技优势

依托热过程重点实验室和力学与环境研究中心,搭建面向高校的技术交流与合作平台;建立国内访问学者制度,形成高等院校与工程研制单位间多层次的交流长效机制;依托973,863,航天创新基金、重点实验室开放课题及单位间战略合作框架,积极开展合作课题研究。

#### 参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] LIU C, CHEN J, LIN Q, et al. An investigation on the second generation 490N bipropellant liquid rocket engine [C]// Proceedings of the 2007 International Symposium on Space Propulsion. Beijing, China: ISSP, 2007: 191-199.
- [3] 李福昌, 余梦伦, 朱维增. 运载火箭工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002.
- [4] 马兴瑞, 韩增尧, 邹元杰, 等. 航天器力学环境分析与条件设计研究进展[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 1-12.
- [5] V 杨, W E 安德松, 主编. 液体火箭发动机燃烧不稳定性[M]. 张宝炯, 洪鑫, 陈杰, 译. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 张蒙正. 液体火箭发动机燃烧不稳定性试验研究简述[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 12-18.
- [7] 聂万胜, 庄逢辰. 自燃推进剂火箭发动机燃烧不稳定性研究[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 63-65.
- [8] 谭永华. 提升基础研究平台能力. 支撑液体动力技术创新发展[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 1-7.

(编辑: 马 杰)