

研究生教材

国防科技大学研究生教材专项经费资助

火箭发动机动力学

HUOJIAN FADONGJI

DONGLIXUE

曹泰岳 编著

国防科技大学出版社

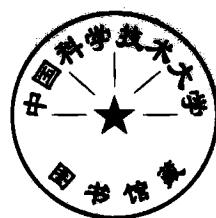
87.93
533

全 国 研 究 生 教 材

国防科技大学研究生教材专项经费资助

火箭发动机动力学

曹泰岳 编著



国防科技大学出版社

·长沙·

内 容 简 介

本书以统一的观点,处理化学能火箭发动机及其主要组件中的非稳态工作过程,兼顾固体发动机和液体发动机、线性与非线性问题、集中参数与分布参数问题。本书所反映的内容可代表 20 世纪 90 年代末俄罗斯,实际上也是国际有关液体发动机动态过程研究的最新水平。全书体系结构合理,便于自学,且与国内、外航天工业的实践紧密结合。

本书可供高等学校航天与航空领域相关专业的研究生使用,亦可供有关工业部门工程技术人员参考。对于新投身于航天与航空领域的其他专业的学生和人员,本书亦不失为一本有益的培训和入门教材。

图书在版编目(CIP)数据

火箭发动机动力学/曹泰岳编著. —长沙:国防科技大学出版社,2004.8

ISBN 7-81099-081-0

I. 火… II. 曹… III. 火箭发动机-气体动力学 IV. V430

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 046123 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:耿 筠, 责任校对:肖 滨

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:29 字数:670 千
2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-2000 册

ISBN 7-81099-081-0/V·1

定价:39.80 元

前 言

为了适应航天领域内提出的诸多高新要求,火箭发动机应沿着不断完善的方向发展,其主要标志就是方案和结构的进一步复杂化以及工作过程参数的进一步提高.从物理-化学过程进行的观点而言,最复杂的莫过于火箭发动机的非稳态工况.人们已经认识到,不应再局限于仅仅研究火箭发动机的稳态工况及静态特性,而有关工作过程的动力学知识更为重要,也是实际必需的.现代化学能火箭发动机的价格、效能及可靠性在更大程度上取决于发动机各组件工作时控制发生在其内的动态过程的知识 and 能力.换言之,研究火箭发动机及其部件在非稳态工况下的行为,即动态特性是火箭发动机研制过程中更重要的理论问题.火箭发动机动力学正是从事火箭发动机非稳态工况(过程)研究的一门学科.

迄今为止,有关火箭发动机在稳态工况下的行为,即静态特性已经研究得比较充分.然而,对其动态特性的研究仍很不充分.其主要原因是动态过程的复杂性,即过程是瞬态的,且具有多参数的联系;此外,有关过程的真实的物理基础也不完全清楚.这些特点对于液体火箭发动机(LRE)是不言而喻的.对于固体火箭发动机(SRM),尽管与LRE相比,其结构因无液体工质及不采用移动和转动机构而变得十分简单,但作为其工作过程基础的固体推进剂的燃烧却是一个十分复杂的现象,目前仍未得到充分、完整的数学描述.此外,SRM的结构和运行简单性恰恰正是以牺牲其保证工况调节系统正常工作的可能性为代价的,故其发展和完善必然导致结构的复杂化(例如,目前,某些类型的SRM具有带液体工质和运动机构的系统).因此,SRM非稳态工况的研究也相对较少.

实践表明,火箭发动机在非稳态工况过程中,其结构内作用有很高的机械的、热的及侵蚀的载荷,在工作过程参数及承载能力的某些不利组合情形下,这些载荷可导致异常状态,乃至关机.显然,发动机工作的可靠性和稳定性主要由其非稳态工况确定.众所周知,火箭发动机是一个复杂的动力学系统,其内包含众多具有大量正向联系和反向联系(反馈)的组件.因此,在研制新型火箭发动机时,除了传统的试验途径外,还可采用数学模拟方法或所谓“计算试验”(或“试验模拟(simulation of tests)”)的途径,即对包括火箭发动机在内的一类复杂的工程对象制定一定的研究程序,该程序借助于电子计算机,且以构造和分析所研究对象的数学模型为基础.随着火箭发动机非稳态工作过程理论研究的不断深入和计算机技术的广泛应用,利用其数学模型进行方案选择、参数优化、系统稳定性计算以及故障模式分析等,已成为火箭发动机研制的一项重要手段.研制人员甚至早在发动机草图设计阶段即可利用发动机各组件及整台发动机的数学模型来解决发动机动态特性的评估及调节系统的分析等问题,这是发动机试验研制开始之前惟一可行的方法.更为重要的是,利用数学模型在计算机上进行“计算试验”,可借助计算机再现发动机在某些条件下的行为,而不必进行、或减少进行费用昂贵,且不甚安全的热试车,从而降低研制费用,加速研制进度,其经济效益是不言而喻的.此外,在为发动机应急保护系统和状态功能技术诊断系统建立故障模式数据库,以及在对发动机试车和飞行试验故障原因分析时,也都要

利用数学模型.由此可见,研究火箭发动机动力学具有十分重要的意义,其应用前景是非常广阔的.

本书系作者多年教授“火箭发动机动力学”课程教学经验的总结,并在授课讲稿的基础上做了较大的扩充,重点论述有关火箭发动机动力学的基础理论知识,以便为日后从事更加深入的研究打下坚实的基础.本书主要综合了前苏联和俄罗斯教科书有关火箭发动机动态过程研究的成果.考虑到各教科书的侧重面有所不同,故本书反映的内容更为全面.

本书以统一的观点处理化学能火箭发动机的非稳态工作过程,以固体发动机(SRM)为先导,液体发动机(LRE)为重点,故将不同类型发动机的相关组件(如两类发动机的燃烧室)的动力学、系统(整机)动力学及相关的现象(如SRM和LRE的启动、SRM和LRE的关机)置于同一章内,既可节省篇幅,还可强调其共性,富于启发性;此外,通过比较又可突出各自的特性.

在全书内容的安排上,本着先易后难、由简入繁的原则.

考虑到部分读者也许对火箭发动机及其系统工作的基本原理尚不熟悉,故作为预备知识,在正式进入动力学讨论之前,首先在第一章中对火箭发动机工作的基本原理进行讨论,在第二章中对火箭发动机的组件和系统的静力学进行讨论.尽管本书研究的对象系“动力学”,但静力学知识同样是十分重要的,须知动力学诸方程其实只不过是在静力学诸方程的基础上增加一非稳态项罢了!此外,对某些组件,在一定条件下,其运动方程是动、静态同形的.基于上述考虑,第二章第三节不得不花较多篇幅对“涡轮泵组件的静态特性”进行必要的讨论.

在第八章讨论系统(整机)动力学之前,先在第三章至第七章中讨论组件动力学.第三章至第五章讨论与一般流体传动和控制相通用的某些组件(如流体管路、气液容腔和自动器组件);第六、七章则讨论火箭发动机独有的某些组件(如燃烧组件和涡轮泵组件(TPA)).由于系统(整机)是由有限的组件按不同方式组合而成的,且系统(整机)方案是大量的、形形色色的,既不可能、也无必要对它们逐一地进行研究,好在系统(整机)特性完全取决于组件特性及组合方式.因此,全书中把相对较为简单的组件动力学作为重点来论述.打好了组件动力学的基础,在第八章讨论复杂的系统(整机)动力学就轻而易举了.

在完成第三章至第八章对火箭发动机组件及系统(整机)中的既可能处于线性范畴也可能处于非线性范畴的非稳态过程(包括振荡过程和过渡过程)的讨论后,第九、十章分别讨论火箭发动机中最典型的两种非线性现象——启动和关机,它们均属于由一个工况向另一个有较大偏离的工况过渡的过渡过程.

在各章内容的安排上,亦遵循先易后难、由简入繁的原则.虽然固体推进剂燃烧的复杂性是不争的事实,但是,在一系列求解与SRM非稳态过程研究有关问题的情形下,燃烧过程可作为准稳态过程来处理.此时,并无必要求解推进剂燃烧方程组,因为推进剂燃速可基于燃速经验定律来确定.这样一来,SRM仍然要比LRE简单得多,故在有关各章中均先讨论SRM,再讨论LRE,从而可适当降低难度.此外,SRM燃烧室在很多情形下也还是LRE的一个重要组件——火药启动器,故在第七章第四节讨论作为LRE涡轮泵组件(TPA)之一的火药启动器时可直接援引第六章第一节对SRM燃烧室讨论所得的结果.

鉴于实际问题(调节、转级、启动及关机)的多样性,本书兼顾线性与非线性问题、集中参数与分布参数问题.本书体系结构合理,便于自学,且与国内、外航天工业的实践紧密结合,具有很强的实用性.本书所描述的非线性微分及代数方程可统一描述 LRE 启动、主级工况及关机的工作过程,反映了 20 世纪 90 年代末俄罗斯,实际上也是国际有关 LRE 动态过程研究的最新水平,具有相当的先进性和启发性.

需要指出的是,在符号下标的使用上,为便于阅读、理解、记忆及避免混淆,本书使用了较长的下标.

本书作为国防科技大学研究生重点课程建设项目的配套教材,在编著和出版过程中,得到航天学院吴建军教授的大力帮助;获国防科技大学研究生教材专项经费资助;西北工业大学何洪庆教授和北京航空航天大学梁国柱教授审阅了全书初稿,并提出了很多宝贵意见;魏鹏飞及郑威、谢廷峰、程玉强、何振、任海峰诸君在图稿准备过程中做了大量的工作.对此,作者表示由衷的感谢.

尽管前后历经两度春秋,仍觉时间仓促,加之水平所限,缺点、错误及遗憾在所难免.再者,面对背景可能迥异的读者群,作者虽用心良苦,仍恐考虑不周,或挂一漏万,或冗杂繁琐.凡此种种不当之处,敬祈读者笑阅之余不吝赐教.

常用符号

1. 主要符号

A	管截面积
A_b	SRM 药柱燃烧面积
A_c	燃烧室横截面积
A_e	喷管出口截面面积
A_p	SRM 药柱通道面积
A_t	喷管喉部截面面积
A_ϕ	喷嘴横截面积
a	局部音速; 固体推进剂燃速系数
a_∞	临界音速
a_∞	无限大液体容积中的音速
C_c	流管截面收缩系数
C_d	流量系数
C_v	小孔速度系数
c	绝对速度
c_F	推力系数
c_p	气体比定压热容
c_s	固体比热容
c_v	气体比定容热容
c^*	特征速度(或压强比冲 I_p 、流量综合参数 β)
$\mathcal{C}$	压强的容积损失系数(或流容系数), 且 $\mathcal{C} = V/a^2$
D	直径
Da_1	Damköhler 第一准则数, 且 $Da_1 = \tau_{\text{stay}}/\tau_{\text{conv}}$
d	管路直径
d_e	管路当量直径
E	活化能; 管壁材料的弹性变形模量
E'	液体的容积弹性模量
e	热力学能或内能
F	推力

F_f	壁面摩擦力
F_H	任意高度 H 上的推力
F_{opt}	最佳推力
F_v	真空推力
f	摩擦因数(或摩擦系数,亦称 Fanning 摩擦系数)
g	重力加速度
H	高度;扬程或压头
h	焓降;能量头,且 $h = \mp w_{shaft} > 0$
h_u	轮缘功或轮周功,或记为 L_u
I_{sp}	比冲量或比推力
I_{spV}	容积比冲(或容积比推力)
I_{spv}	真空比冲(或真空比推力)
I_t	总冲量
i	气体静焓;
i^0	气体总焓
J	后效冲量;SRM 喉面 - 通气面积比,且 $J = A_t/A_p$
j	流体的密流或流密,且 $j = \rho v = \dot{m}/A$;固体推进剂的质量燃速,且 $j = \rho_s r = \dot{m}_b/A_b$
K	SRM 燃面 - 喉面比,且 $K = A_b/A_t$
K_m	双组元 LRE 推进剂组元比
$K_{m\text{stoi}}$	双组元 LRE 推进剂化学计量组元比
k	比热比
$\bar{L}$	长度
L_u	轮缘功或轮周功,或记为 h_u
L_{0s}	燃气可用等熵膨胀功,亦称可用能量头或技术功 w_{tech} (或压力功),且
	$L_{0s} = w_{tech} = - \int_1^2 v dp$
L'_{0s}	燃气等熵膨胀功,亦称能量头 h_u
L^*	燃烧室特征长度,且 $L^* = V_c/A_t$
$\mathcal{L}$	压强的惯性损失系数(或流感系数)
M	气流 Mach 数;转矩
m	质量
m_p	推进剂质量
$\dot{m}$	质量流量
$\dot{m}_b$	SRM 燃气生成率
$\dot{m}_{gg}$	通过 GG 的质量流量

$\dot{m}_T$	通过涡轮的质量流量
$\dot{m}_t$	通过喷管喉部截面的质量流量
$\dot{m}_\phi$	通过燃烧室喷注头上喷嘴的推进剂的质量流量
n	固体推进剂燃速压强指数; 气体多变指数; 转速
n_g	1kg 混合气体中总的物质的量, 且 $n_g = \sum_{i(g)} n_i$
n_i	1kg 燃烧产物中第 i 种组分的物质的量
P	功率
P_{sp}	涡轮比功率
p	流体压强
p_a	周围介质压强
p_c	燃烧室压强
p_e	喷管出口截面压强
p_{pf}	燃烧剂泵后的压强
p_{pox}	氧化剂泵后的压强
p_{tank}	贮箱压强
$p^\ominus$	标准状态下的压强, 通常取 $p^\ominus = 0.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ (早期为 $p^\ominus = 0.101325 \times 10^6 \text{ Pa}$)
Δp_f	沿程(摩擦)压强损失
Δp_l	局部压强损失
Δp_ϕ	通过喷嘴小孔前、后的压降
Q	热量
q	热流量
$q(\lambda)$	与流量有关的气动函数, 亦称折算流量, 且 $q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{1/(k-1)} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{1/(k-1)} = \frac{\rho v}{(\rho v)_\infty}$
R	气体常数(单位质量的); 半径
R^0	通用(或摩尔)气体常数, 且 $R^0 = 8314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
Re	Reynolds 数
$\mathcal{R}$	压强的流动阻力系数(或流体管路的流阻)
r	半径; 固体推进剂燃速; 线性流阻
S	燃烧周长
s	熵; 复变量
T	热力学温度
T_c	燃烧室温度
T_e	喷管出口温度
T_i	推进剂初温

T_t	喷管喉部温度
t	时间
t_a	工作时间
u	圆周速度
V	容积
V_c	燃烧室容积
$\dot{V}$	容积流量
v	速度;比容
v_e	喷管排气速度
v_{eff}	有效排气速度
$W(s)$	传递函数
w	相对速度
w_{shaft}	单位质量工质通过叶片式流体机械的轴向外输出的轴功
w_{tech}	技术功(或压力功)
$\gamma(\lambda)$	与流量有关的气动函数,且 $\gamma(\lambda) = q(\lambda)/\pi(\lambda)$
α	双组元 LRE 中的氧化剂剩余系数(或余氧系数),且 $\alpha = K_m/K_{m,stoi}$;动能修正系数;绝对流动角
α_p	等压膨胀系数
β	动量修正系数或 Кориолис 系数;相对流动角
β_T	等温压缩系数
$\Gamma(k)$	与比热比有关的常数,亦称比热比函数,且
$\Gamma(k) = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$	
ζ	阻尼系数
ζ_f	沿程损失系数
ζ_l	局部损失系数
η	效率
η_{pf}	燃烧剂泵效率
η_{pox}	氧化剂泵效率
η_T	涡轮效率
λ	速度系数或折算速度;摩擦损失系数,亦称 Darcy 摩擦因子;
μ	摩尔质量;流量系数;动力粘性系数
μ_n	喷管流量系数
ξ	管段总阻力系数
ξ_f	沿程(摩擦)阻力系数
ξ_l	局部阻力系数

Π_{wet}	管路横截面上的湿润周边长度
π_K	SRM 室压对推进剂初温的敏感性
π_T	用静压表示的涡轮(降/落)压比,且 $\pi_T = p_0^0/p_2$
π_T^*	用总压表示的涡轮(降/落)压比,且 $\pi_T^* = p_0^0/p_2^0$
$\pi(\lambda)$	表示压强比的气动函数,且 $\pi(\lambda) = p/p^0$
ρ	密度
ρ_c	燃烧室内燃气密度
ρ_f	燃烧剂密度
ρ_g	气体密度
ρ_k	运动反作用度
ρ_l	液体推进剂密度
ρ_{ox}	氧化剂密度
ρ_p	推进剂密度
ρ_s	固体推进剂密度
ρ_t	热力反作用度
σ_p	SRM 中燃速对推进剂初温的敏感性
τ	壁面剪切应力
τ_c	燃烧室时间常数
τ_{conv}	转化时间
τ_d	滞后时间;反应速率系数的倒数
τ_{di}	着火延迟(滞后)时间
τ_{stay}	停留时间
φ_{p_c}	燃烧室压强丰满度系数
φ_a	因扩张而引起的排气速度损失
χ_c	燃烧室内平均热损失系数
ω	旋转角速度

2. 下标

c	燃烧室;凝相
cr	临界值
e	喷管出口截面
eng	发动机
f	燃烧剂
g	气相,气体
gg	燃气发生器
in	入口截面
l	液体

line	流体管路
out	出口截面
ox	氧化剂
p	泵
rgl	调节机构
s	固体
s	等熵条件
T	涡轮;贮箱
t	喷管喉部截面
tc	推力室
ted	涡轮废气排气喷管
th	理论值
thro	节流阀
ϕ	喷嘴(“форсунка”)
0	滞止参数或总参数;涡轮静叶(喷嘴环)进口截面
1	涡轮静叶(喷嘴环)出口或动叶进口截面
2	涡轮动叶出口截面
3. 上标	
(⁰)	额定工况;气流总参数(或滞止参数)
$\ominus$	标准状态
(—)	无因次量
4. 发动机类别	
HRE	混合式火箭发动机
LRE	液体推进剂火箭发动机
SRM	固体推进剂火箭发动机
5. 发动机部件	
BPA	预压泵组件(booster pump assembly)
BPO	氧化剂预压泵(booster pump of oxidizer)
CC	燃烧室
Engine	发动机
GC	燃气发生器
GL	燃气导管
GPA	气体蓄压器(gas pressure accumulator)
HeatX	换热器(heat exchanger)
JFP	射流前置泵(jet forepump)
LGG	液体推进剂燃气发生器
MH	混合头(mixing head)
P	推进剂泵

R	减压器(reducer)
Rgl	流量调节器(regulator)
SGG'	固体推进剂燃气发生器
T	推进剂贮箱
TC	推力室(thrust chamber)
TED	涡轮废气排气喷管(turbine exhaust duct)
TPA	涡轮泵组件
Thro	节流阀(throttle valve)

目 录

常用符号

绪论

一、动力学的研究对象	(1)
二、动力学的研究方法	(2)
三、低频率非线性动力学的数学基础	(4)
四、自动调节动力学的数学基础	(6)
思考题	(8)

第一章 模拟对象工作基本原理

第一节 物理原理和基本参数	(10)
一、化学能火箭发动机的分类	(10)
二、推力室和发动机的推力	(16)
三、推力室和发动机的比参数	(19)
四、火箭、发动机和推进剂参数间的关系	(22)
第二节 喷管流计算	(26)
一、基本假设和控制方程	(26)
二、排气速度	(29)
三、喷管构形和通过喷管的质量流量	(30)
四、推力和推力系数	(33)
五、欠膨胀和过膨胀	(35)
第三节 热化学计算	(36)
一、热化学计算的任务和原始数据	(37)
二、热化学计算基本方程组	(37)
三、绝热燃烧过程和等熵流动过程热化学计算	(41)
四、平衡组分计算方法概述	(43)
第四节 燃烧室内过程计算	(43)
一、SRM 内弹道计算	(44)

二、LRE 燃烧室内过程计算	(47)
思考题	(48)

第二章 火箭发动机及其主要组件的静态特性

第一节 流体管路的静态特性	(51)
一、液路、气路及与流动有关的流体属性	(51)
二、一维稳态流动基本方程	(52)
三、流体管路静态特性	(54)
四、摩擦损失系数及局部损失系数的确定	(57)
五、孔口及缝隙流动特性	(61)
第二节 涡轮泵组件的静态特性	(65)
一、涡轮泵组件静态特性概述	(65)
二、LRE 推进剂泵和涡轮的主要性能参数	(66)
三、LRE 推进剂泵和涡轮中的能量转换	(77)
四、LRE 推进剂泵和液涡轮中的空化与空蚀	(100)
五、LRE 推进剂泵和涡轮的特性曲线	(107)
第三节 固体火箭发动机推力调节方案	(120)
一、SRM 推力大小调节方法	(120)
二、通过改变喷喉面积来调节 SRM 的推力	(123)
三、通过向燃烧室喷入辅助工质来调节 SRM 的推力	(129)
四、通过改变固体推进剂燃速来调节 SRM 的推力	(133)
五、通过改变燃烧面积来调节 SRM 的推力	(136)
六、通过改变喷管出口面积来调节 SRM 的推力	(137)
第四节 火箭发动机的静态特性	(139)
一、火箭发动机静态特性概述	(139)
二、火箭发动机的高度特性	(141)
三、火箭发动机的节流特性	(143)
思考题	(148)

第三章 流体管路动力学

第一节 流体在管内非稳态流动的控制方程	(151)
一、原始方程	(151)

二、原始方程的某些变换	(153)
第二节 具有集中参数的液体管路动力学	(155)
一、在具有集中参数的管内液体的运动方程	(155)
二、液体推进剂组元从贮箱到燃烧室的运动方程	(157)
三、具有集中参数的液体管路的动态特性	(159)
四、流体管路中的容积损失	(160)
五、液体推进剂组元对流体管路的充填	(161)
第三节 具有分布参数的液体管路动力学	(164)
一、具有分布参数的液体管路的动态特性	(164)
二、求解具有分布参数的液体管路的某些其他方法	(167)
三、液体管路中的水击	(172)
思考题	(179)

第四章 气液容腔动力学

第一节 气液容腔的分类	(181)
第二节 带隔离气体的气液容腔动力学	(182)
一、基本假设	(182)
二、基本方程	(182)
三、示例	(183)
第三节 带可排出气体的气液容腔动力学	(186)
第四节 带气液两相介质的气液容腔动力学	(186)
一、无气体吹入时混合头的充填	(187)
二、有气体吹入时混合头的充填	(189)
三、发动机关机时混合头的排空	(192)
四、气液容腔和不稳定换热过程	(193)
思考题	(196)

第五章 自动器组件动力学

第一节 自动器组件概述	(197)
一、自动器组件的概念	(197)
二、自动器组件的分类	(198)

三、自动器组件的基本元件	(199)
四、自动器非稳态过程的特点	(203)
第二节 自动器组件的非稳态方程	(205)
一、运动物体在外力作用下的力平衡方程	(205)
二、工作介质的质量守恒(连续性)方程	(205)
三、工作介质的运动方程	(207)
第三节 变质量气体系统的基本方程	(208)
一、变质量工质热力学第一定律的一般形式	(208)
二、变质量工质热力学第一定律的转换形式	(210)
第四节 自动器执行机构受力分析	(211)
一、液体或气体作用在执行机构上的压强力	(211)
二、摩擦力	(221)
三、弹性元件力	(224)
四、电磁力	(225)
第五节 几种典型自动器的动力学	(228)
一、气动阀	(228)
二、(液体)减压阀	(232)
三、(液体)流量控制阀	(236)
思考题	(251)
第六章 燃烧组件动力学	
第一节 固体火箭发动机燃烧室动力学	(253)
一、SRM 燃烧室动力学概述	(253)
二、SRM 零维内弹道方程组	(254)
三、SRM 燃烧室动态特性	(257)
第二节 液体火箭发动机燃烧组件动力学	(263)
一、LRE 燃烧组件动力学概述	(263)
二、液体推进剂组元的转化(燃烧)过程	(264)
三、作为具有集中参数的系统的燃烧组件	(266)
四、作为具有分布参数的系统的燃烧室	(279)
思考题	(288)