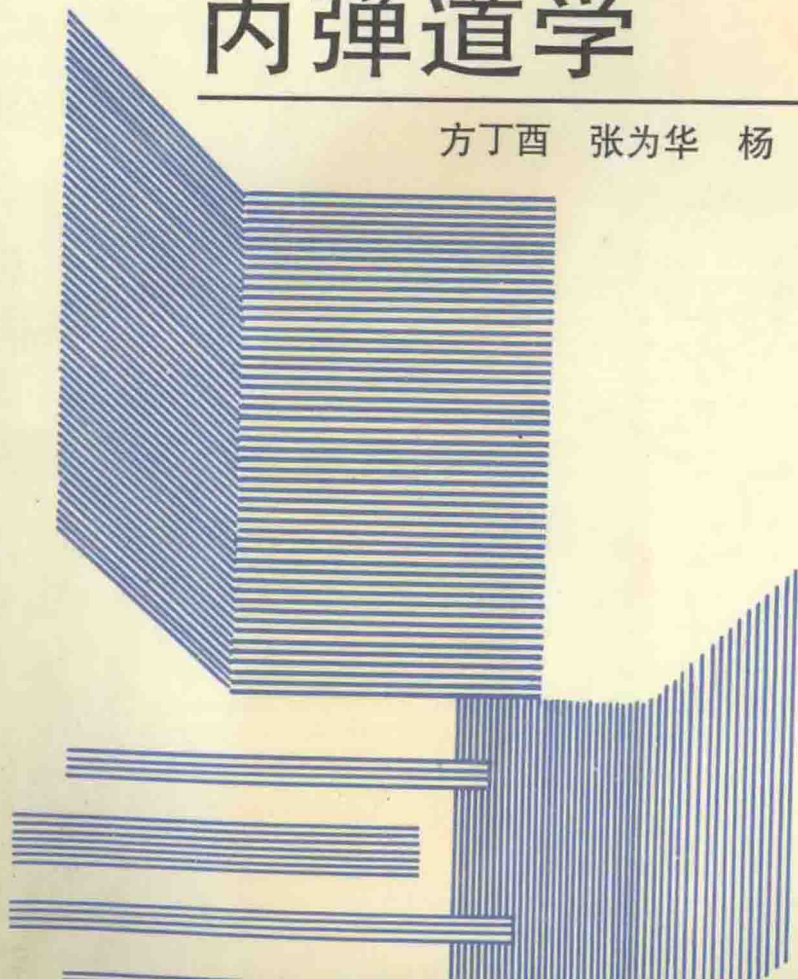


● 研究生教材 ● 研究生教材

航天技术系列丛书

固体火箭发动机 内弹道学

方丁酉 张为华 杨 涛 编著



■研究生教材■

航天技术系列丛书

固体火箭发动机 内弹道学

方丁酉 张为华 杨涛 编著

国防科技大学出版社 湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

固体火箭发动机内弹道学/方丁酉,张为华,杨涛. —长沙:国防科技大学出版社,1997. 10

ISBN 7-81024-462-0

- I 固体火箭发动机内弹道学
- II 方丁酉 张为华 杨涛
- III 固体推进剂火箭发动机-内弹道学
- IV V435

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4505241 邮政编码:410073

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

责任编辑:张建军 责任校对:谢小伟

新华书店总店北京发行所经销

湖南大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:13.5 字数:339 千

1997 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—1000 册

定价:20.00 元

《航天技术系列丛书》

编 辑 委 员 会

主 任 张育林

副主任 王振国 周建平

委 员	陈 宏	张为华	周 进	唐乾刚
	于起峰	吴其芬	苏明照	曹泰岳
	秦子增	于晏悦		

秘 书 汪赵新 程安怀

内容简介

本书系统地介绍了固体火箭发动机两相化学反应可压缩湍流内弹道计算方程组和发动机内流场计算方法,全面地介绍了常规固体火箭发动机、无喷管固体火箭发动机、旋转固体火箭发动机和嵌长金属丝药柱固体火箭发动机内弹道计算方法和固体火箭发动机系统辨识、性能散布分析和燃烧转爆轰模拟等新技术;并较详细地介绍了固体推进剂相关的膏体推进剂发动机、固体燃料冲压发动机、固体火箭冲压发动机和混合火箭发动机。

本书是一本学术专著,可作为火箭发动机专业研究生的教科书,亦可供从事固体火箭发动机、固体推进剂和导弹总体设计研究的科技人员及有关专业的科技人员参考。

序 言

固体火箭发动机内弹道学是固体火箭推进理论的核心内容,是固体火箭发动机设计的基础。几十年来,随着固体火箭推进技术的发展,固体火箭发动机以它独特的优点已广泛应用于火箭、导弹武器、航天运载和探空火箭等。除了常规固体火箭发动机外,发展了应用于各种特殊情况的无喷管固体火箭发动机、旋转固体火箭发动机和嵌长金属丝药柱固体火箭发动机等。在固体火箭发动机内流场计算方面,由零维、一维发展到二维、三维流动,由一相流发展到两相流,由无粘流发展到湍流,由冻结流发展到化学反应流,流场计算日趋完善。在研究固体火箭发动机内部工作过程方面,发展了固体火箭发动机系统辨识、性能散布分析和燃烧转爆轰模拟等技术。这些成果使固体火箭发动机内弹道学更加完善,并有了新的发展。

近年来,本书的作者及其同事相继完成了常规固体火箭发动机内弹道、两相流动力学、旋转固体火箭发动机内弹道、嵌长金属丝药柱固体火箭发动机内弹道、无喷管固体火箭发动机内弹道、固体火箭发动机点火器流量预示、固体火箭发动机内流场计算及固体火箭发动机系统辨识、性能散布分析、燃烧转爆轰等课题的研究。本书总结了作者在教学实践和科学研究中的成果,并吸取了国内外在固体火箭发动机内弹道研究方面的新进展。本书共分四篇17章。第一篇介绍了固体火箭发动机内弹道计算方程。针对学习固体火箭发动机的学生在两相、化学反应和湍流等方面知识的短缺,本篇系统地介绍了两相化学反应可压缩湍流的雷诺时均运动

方程、Favre 平均运动方程和湍流模型。第二篇介绍了各种固体火箭发动机内弹道计算方法,在常规固体火箭发动机内弹道计算中考虑了点火器工作过程对主发动机压强上升段的影响。第三篇介绍了固体火箭发动机系统辨识、性能散布分析和燃烧转爆轰数值模拟等技术。第四篇介绍了固体推进技术相关的膏体推进剂发动机、固体燃料冲压发动机、固体火箭冲压发动机和混合火箭发动机。

本书第 1-5、9、10 章由方丁酉执笔,第 6、7、8、15 章由张为华执笔,第 11、12 章由杨涛执笔,第 14、16、17 章由方丁酉、张为华和杨涛共同执笔。全书由方丁酉定稿,张为华和杨涛审核,张为华校核。

本书内容及编排新颖,反映了当前该领域研究的先进水平,理论联系实际。除第一篇各章有内在联系外,其余各章都是独立的专题,读者可选择自己感兴趣的章节阅读。本书力求基本概念清楚、公式推导正确、方法叙述简明实用。由于作者水平有限,缺点甚至错误也在所难免,望读者指正。

感谢国防科技大学研究生院在本书出版过程中寄予的关心和支持。感谢国防科技大学航天技术系提供的经费资助。感谢所有参加课题研究和为本书出版提供过帮助的人们。

编著者

1997 年 8 月于国防科技大学

目 录

第一篇 固体火箭发动机内弹道计算基本方程

1 粘性流体运动的基本方程

1.1 概述	1
1.2 流体应力	2
1.3 雷诺输运定理	5
1.4 质量守恒方程	7
1.5 动量守恒方程	8
1.6 能量守恒方程	10
1.7 粘性流体运动的基本方程	11
参考文献	12

2 可压缩湍流平均运动方程

2.1 可压缩湍流雷诺时均运动方程组	13
2.2 可压缩湍流 Favre 平均运动方程	17
2.3 湍流模型	18
参考文献	36

3 化学反应湍流平均运动方程

3.1 化学反应流体的运动方程	38
3.2 化学反应湍流的雷诺时均运动方程	43
3.3 化学反应湍流 Favre 平均运动方程	47
参考文献	51

4 气-粒两相湍流平均运动方程

4.1 概述	52
4.2 气-粒两相流动基本方程	61
4.3 颗粒轨道模型	65

4.4	颗粒拟流体模型·····	70
	参考文献·····	74
5	一维内弹道计算方程	
5.1	侧面加质的一维两相化学反应流运动方程·····	76
5.2	药柱通道中一维两相流动方程·····	85
5.3	药柱通道中一维流动方程·····	86
5.4	一维管流运动方程·····	87
	参考文献·····	89

第二篇 固体火箭发动机内弹道学

6	常规固体火箭发动机内弹道学	
6.1	固体火箭发动机点火器流量预示·····	90
6.2	固体火箭发动机零维内弹道计算·····	103
6.3	固体火箭发动机一维准定常内弹道计算·····	105
6.4	固体火箭发动机一维非定常内弹道计算·····	110
6.5	固体火箭发动机一维非定常两相流内弹道计算·····	112
	参考文献·····	116
7	无喷管固体火箭发动机内弹道学	
7.1	无喷管固体火箭发动机·····	118
7.2	无喷管固体火箭发动机一维准定常内弹道计算·····	123
7.3	无喷管固体火箭发动机一维非定常内弹道计算·····	125
7.4	无喷管固体火箭发动机内弹道实验研究·····	133
7.5	可燃喷管固体火箭发动机·····	136
	参考文献·····	142
8	旋转固体火箭发动机内弹道学	
8.1	引言·····	144
8.2	旋转固体火箭发动机内弹道实验研究·····	144
8.3	旋转固体火箭发动机燃速敏感性预示·····	157

8.4	旋转固体火箭发动机零维和一维内弹道计算	165
	参考文献	174
9	药柱嵌长金属丝固体火箭发动机内弹道学	
9.1	概述	177
9.2	嵌长金属丝药条的燃烧	178
9.3	影响推进剂沿金属丝燃速大小的因素	183
9.4	嵌长金属丝药柱在发动机中的燃烧	191
9.5	药柱嵌长金属丝固体火箭发动机内弹道计算	199
	参考文献	222
10	固体火箭发动机内轴对称流动	
10.1	概述	223
10.2	轴对称流动控制方程	223
10.3	湍流模型	226
10.4	网格设计和坐标变换	228
10.5	计算平面上的控制方程	240
10.6	边界条件	242
10.7	数值计算	250
10.8	算例	252
	参考文献	253

第三篇 固体火箭发动机参数辨识、 性能散布和燃烧转爆轰

11	固体火箭发动机系统辨识	
11.1	概述	255
11.2	最小二乘法原理	257
11.3	稳态燃速辨识	264
11.4	喷管喉径变化辨识	268

11.5	固体火箭发动机瞬变参数辨识·····	277
	参考文献·····	282
12	固体火箭发动机性能散布分析	
12.1	引言·····	283
12.2	用实验数据统计分析确定内弹道散布规律·····	284
12.3	用 Monte Carlo 法确定内弹道特性参数散布·····	292
12.4	确定内弹道散布的理论分析方法·····	296
12.5	用 Monte Carlo 法分析固体火箭发动机推力终止 过程内弹道散布·····	301
	参考文献·····	306
13	高能固体推进剂的燃烧转爆轰	
13.1	引言·····	308
13.2	一维反应两相流模型·····	320
13.3	燃烧转爆轰过程的数值模拟·····	332
13.4	有待进一步研究的专题·····	343
	参考文献·····	344

第四篇 固体火箭推进相关技术

14	膏体推进剂发动机	
14.1	概述·····	348
14.2	膏体推进剂·····	349
14.3	膏体推进剂燃烧·····	351
14.4	膏体推进剂发动机的推力调节和再启动·····	352
	参考文献·····	358
15	固体燃料冲压发动机	
15.1	概述·····	359
15.2	固体燃料冲压发动机·····	364
15.3	固体燃料冲压发动机燃烧·····	366

15.4	固体燃料冲压发动机工作过程数值模拟·····	369
	参考文献·····	372
16	整体式固体火箭冲压发动机	
16.1	概述·····	373
16.2	固体火箭冲压发动机性能计算·····	374
16.3	燃气发生器和贫氧推进剂·····	386
	参考文献·····	392
17	混合火箭发动机	
17.1	概述·····	393
17.2	混合火箭发动机的发展和推进剂·····	395
17.3	混合火箭发动机内弹道学·····	402
17.4	混合火箭发动机的推力调解·····	413
	参考文献·····	416

第一篇 固体火箭发动机内弹道 计 算 基 本 方 程

固体火箭发动机内部工作过程由推进剂燃烧和燃气流动两大部分组成。在固体火箭发动机内弹道计算中,推进剂燃烧通常由实验测定的稳态燃速、侵蚀燃速和瞬变燃速等来描述,而燃气流动由一组燃气运动方程来描述。因此,内弹道计算的实质是数值解发动机内部的燃气运动方程,以求得发动机工作参数,特别是燃烧室压强、发动机推力随时间的变化规律。固体火箭发动机内燃气流动是非常复杂的,燃气中通常含有金属和金属氧化物颗粒(例如 Al , Al_2O_3),不但气相各组分之间存在着化学反应,而且伴随有气相与颗粒间的质量、动量和能量传递。因此,发动机内流动是两相反应湍流流动。本篇各章分别研究粘性流体运动基本方程、可压缩湍流运动方程、化学反应流湍流运动方程、气-粒两相流动运动方程和一维内弹道计算方程。

1 粘性流体运动的基本方程

1.1 概述

在火箭发动机有关燃烧、流动的计算中,燃气的特性通常引入两种不同的假设,一是假设燃气为无粘的,二是假设燃气有粘性。实际上,一切流体都是有粘性的,但粘性对不同问题所起的作用往往不同。例如计算燃烧室内发生的燃烧和燃气流动,考虑燃气的粘

性是必要的;又如计算喷管内的分离流动,也必须考虑燃气的粘性。

对于无粘流体,流体层之间即使有速度差,也没有切向间的相互作用,而且流体相对壁面作滑移运动,与壁面之间没有摩擦力。但对于粘性流体,两相邻层间有速度差就有切向力(摩擦力)相互作用,而且贴壁的流体完全粘附于壁上。因此,粘性流体运动有别于无粘流体的主要标志是流体中存在切应力和流体粘附于壁面。正是这一差别,粘性流体运动与无粘流体运动有着重大的差异。

粘性流体运动有两种稳定状态,一是层流流动状态,二是湍流流动状态。流体微团作有规则运动,相邻流体微团的迹线互不交错,流体一层一层地运动,这种流动状态叫做层流流动。层流流动发生在雷诺数较小的场合。流体微团作无规则运动,迹线形状十分复杂,相邻流体微团迹线相互交错,这种流动状态叫做湍流流动。湍流流动发生在雷诺数较高的场合。实验表明,在粘性流体运动中,随着雷诺数的增大都将发生层流向湍流的过渡,当雷诺数达到一定值时,流动转换为完全的湍流流动状态。由于层流和湍流流动结构不同,它们之间的运动性质也有重大差别。

1.2 流体应力

在无粘流体运动中,作用于流体中任一平面上的流体应力只有法向应力(压强),但在粘性流体运动中,流体应力除了法向应力外,还有切向应力。

设流体为三维 (x, y, z) 流动, $\mathbf{n}$ 是流体空间点P微元面的单位法向矢量,作用在微元面上的应力为 $\mathbf{P}_n$,它在 x, y, z 方向上的应力分量为 P_{nx}, P_{ny}, P_{nz} (其中第一个下标表示受力平面的法线方向,第二个下标表示应力分量的方向),则有

$$\mathbf{P}_n = P_{nx}\mathbf{i} + P_{ny}\mathbf{j} + P_{nz}\mathbf{k}$$

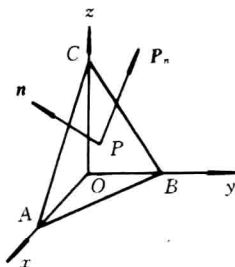


图 1.1 微元四面体

作微元四面体 $OABC$ (图 1.1), P_n 应力作用于 ABC 微元面上, 其它三个微元面分别与 x, y, z 轴垂直, 在这三个面上共作用有九个应力: $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz}$ 。根据作用于微元体上的应力平衡, 得

$$P_{nx} = \sigma_{xx}n_x + \sigma_{yx}n_y + \sigma_{zx}n_z = P_x \cdot n$$

$$P_{ny} = \sigma_{xy}n_x + \sigma_{yy}n_y + \sigma_{zy}n_z = P_y \cdot n$$

$$P_{nz} = \sigma_{xz}n_x + \sigma_{yz}n_y + \sigma_{zz}n_z = P_z \cdot n$$

式中 n_x, n_y, n_z 是法矢量 n 在 x, y, z 方向上的分量; P_x, P_y, P_z 三个矢量是应力张量 $[\sigma]$ 的三个分矢量。作用于点 P 的流体应力可进一步写为:

$$P_n = [\sigma] \cdot n \quad (1.1)$$

应力张量 $[\sigma]$ 完全由九个应力分量确定, 其张量表达式为:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

由于 $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, $[\sigma]$ 是一个二阶对称张量。

由广义牛顿粘性定律知,应力张量 $[\sigma]$ 与变形率张量 $[\epsilon]$ 之间有
下列关系式:

$$[\sigma] = 2\mu[\epsilon] - (p - \lambda \nabla \cdot \mathbf{V})[I] \quad (1.2)$$

式中 $[I]$ 是单位矩阵; λ 是第二粘性系数,由 Stokes 假设给出: $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 。变形率张量为:

$$[\epsilon] = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

其中 $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$ $\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$ $\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

上述诸式中 u, v, w 是流速 $\mathbf{V}$ 在 x, y, z 方向上的分量, μ 是流体粘性系数, p 是压强。

由式(1.2)可写出应力张量各分量的表达式:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{V})\delta_{ij} \quad (1.3)$$

式中 x_i, x_j 和 $u_i, u_j (i=1,2,3; j=1,2,3)$ 分别表示 x, y, z 和矢量 $\mathbf{V}$ 在 x, y, z 方向的分量。 δ_{ij} 是 Kronecker 符号,即当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。

把压强 p 单独分离出来,应力张量的分量可写成:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (1.4)$$

其中 $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{V})\delta_{ij}$, 它构成的应力张量为:

$$[\tau] = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

对于不可压缩流,后面将证明有 $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$, 则其应力张量 $[\tau]$ 的分量为: $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

1.3 雷诺输运定理

在充满流体的空间任取一控制体 V , 控制面为 A , 并有一流体微团(称为体系)在 t 时刻占据控制体, 考察体系运动中体系内某物理量 Φ 的变化。

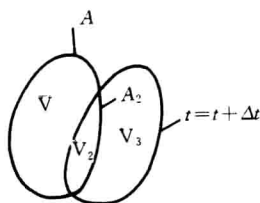


图 1.2 控制体和体系

设 φ 是体系中单位体积某物理量, 则有

$$\Phi = \int_V \varphi dV$$

追踪体系运动, 经过 Δt 时间后, 体系占据部分控制体体积 V_2 和部分控制体体外体积 V_3 (图1.2), 体系中物理量在 t 时刻的变化率为:

$$\begin{aligned} \frac{D\Phi}{Dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Phi_{t+\Delta t} - \Phi_t}{\Delta t} \\ \Phi_{t+\Delta t} &= \left(\int_{V_2} \varphi dV + \int_{V_3} \varphi dV \right)_{t+\Delta t} \\ \Phi_t &= \left(\int_{V-V_2} \varphi dV + \int_{V_2} \varphi dV \right)_t \end{aligned}$$