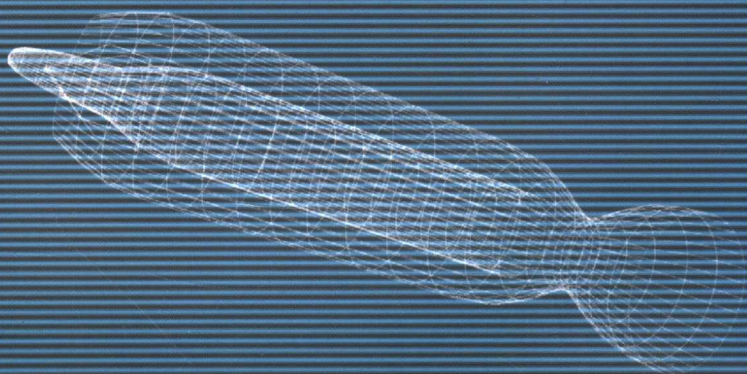


航空宇航科学与技术



脉冲爆震发动机 原理及关键技术

严传俊 范玮 等著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著

脉冲爆震发动机原理及关键技术

严传俊 范 玮 等著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

脉冲爆震发动机是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机。本书比较全面地介绍了脉冲爆震发动机的研究现状和发展趋势,系统地总结了作者十多年来在脉冲爆震发动机方面的研究成果,着重介绍脉冲爆震的特点,脉冲爆震发动机工作原理、热力循环及性能分析方法,脉冲爆震发动机的结构形式、总体及部件概念设计,脉冲爆震发动机的试验技术,以及脉冲爆震发动机原理性试验结果和数值模拟等。

本书可供航空宇航推进理论与工程专业的工程技术人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲爆震发动机原理及关键技术/严传俊,范玮等著. —西安:西北工业大学出版社,2005.10

ISBN 7-5612-1934-2

I. 脉… II. ①严…②范… III. 脉冲爆发—发动机 IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 040537 号

脉冲爆震发动机原理及关键技术

严传俊 范玮等著

责任编辑 王蓁 责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844,88491757

<http://www.nwpup.com>

西安新华印刷厂印制 各地书店经销

开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:18.5 字数:463 千字

2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印制 印数:1~2 000 册

ISBN 7-5612-1934-2 定价:36.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对



经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防



科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



序 言

脉冲爆震发动机是一种新概念发动机。由于爆震比爆燃有着理论上的优点,爆震推进概念的研究近十几年来得到极大的重视,并取得了重要进展。但到目前为止,脉冲爆震发动机尚处于探索性、研究性阶段。有关文献虽然很多,但很分散,缺乏系统的阐述。本书概括了当今该领域的有关科研成果,从阐述爆震物理基础开始,系统地介绍了脉冲爆震发动机的研究现状、应用前景、工作原理、性能分析方法、结构形式、工作过程的控制和设计、数值模拟、原理性试验和关键技术,特别是包含了作者多年来的研究成果。这是我国第一部系统介绍脉冲爆震发动机的专著,对我国进一步研究脉冲爆震发动机和该学科的发展有很大的推动作用,亦可作为推进领域研究生和本科生的教材。

解放军装备指挥技术学院教授,中科院院士

庄逢辰

2004年10月



前 言

脉冲爆震发动机是一种利用脉冲式爆震波产生推力的全新概念发动机。它与传统的燃气涡轮发动机工作方式有很大的区别。燃气涡轮发动机利用压气机使工作流体增压,然后进行等压燃烧来提高工作流体的内能,从而获得推力;然而,脉冲爆震发动机是利用爆震波使工作流体增压并进行等容燃烧。在两者总压比相等的条件下,脉冲爆震发动机能够使工作流体获得更多的内能,并具有更高的循环效率。脉冲爆震发动机的结构比较简单,其本身可以是一根直管,并且横截面形状可以不局限于圆形;然而燃气涡轮发动机的涡轮转子和压气机转子的工作方式决定了燃气涡轮发动机中的截面形状只能是圆形。脉冲爆震发动机中主要的运动部件是一个高速旋转的阀门,这个阀门用来控制燃料和氧化剂进入起爆管和主燃烧室,以及防止爆震燃烧过程中的倒流。爆震波的起爆是通过在起爆管内用一个和汽车火花塞一样简单的点火装置实现的。起爆后,爆震波从起爆管传入主燃烧室引爆主燃烧室内的可燃混合物。在爆震燃烧过程中,爆震波向主燃烧室尾部运动,直到排出主燃烧室。爆震波可以看做是一个以大于 1800 m/s 的速度传播的、压比(激波后压力和环境压力比)近似为 $20:1$ 的压力波。爆震波后气体的平均压力和环境压力比接近 $6:1$,脉冲爆



震发动机就是依靠这个压力来获得推力的。爆震波排出燃烧室后,相应地有一道相位相反的膨胀波传入燃烧室,从而使燃烧室内的压力低于环境压力,此时开启阀门可以很容易吸入用于下一次爆震的燃料和氧化剂,然后脉冲爆震发动机重复上述循环过程。脉冲爆震发动机能够在海平面标准大气状态下不通过预压缩产生推力,这一独特的属性使它有可能用于各种飞行器的推进系统。

脉冲爆震发动机分为吸气式和火箭式。火箭式脉冲爆震发动机与吸气式脉冲爆震发动机的主要区别是它需要自带氧化剂。使用结构简单的脉冲爆震火箭发动机,能使飞行器的比冲或者有效承载能力增大。爆震波固有的增压能力(压比6:1)可以减少使用或者完全不使用涡轮泵,而同样可以使工作流体充分增压,从而大大简化了推进系统。据估计,脉冲爆震火箭发动机在飞行包线范围内用于第二级或者更高级火箭比用于第一级火箭更具有潜力。这是由于相对于用在第一级火箭来说,用于第二级火箭有利于减小火箭的总体尺寸的缘故。

脉冲爆震发动机较之常规的推进系统有着独特的诱人的优点,例如热循环效率高、推重比大、工作范围宽、结构简单、质量轻,尤其是因为能分别以吸气式和火箭式两种模态工作等优点,引起了人们的广泛关注。从20世纪40年代开始,人们已对爆震燃烧应用于推进系统的可行性进行了研究。近十多年来,世界各国对脉冲爆震发动机的研究进入了全面发展时期,已完成了概念验证,开始进行原型机的发展和试验。在脉冲爆震发动机关键技术研究方面取得了不少进展,从而引起人们对脉冲爆震发



动机在很多方面的潜在应用产生了浓厚的兴趣。脉冲爆震发动机的潜在应用包括商用、军用和空间技术。在商用方面,可用于亚声速和超声速民航及空间飞行;在军事方面,可用于一次性作战系统和战术飞行器等。

西北工业大学脉冲爆震发动机研究小组从1994年起在国家自然科学基金(批准号为59776001,50336030)和多项科研项目的资助下,开展了脉冲爆震发动机应用基础研究,取得了一系列重要进展和成果。为了总结经验,扩大交流与合作,本书作者有意对过去十多年来在脉冲爆震发动机研究方面所取得的研究成果进行总结,为我国有志于从事这种新型发动机研究的工程技术人员和航空宇航推进理论与工程专业的师生提供参考。

本书较全面地介绍了在脉冲爆震发动机研究方面的现状和发展趋势,系统地阐述了课题组所取得的研究成果,着重介绍爆震燃烧的物理基础,脉冲爆震发动机的工作原理、热力循环和性能分析方法,脉冲爆震发动机的结构形式、总体及部件概念设计,脉冲爆震发动机的试验技术,脉冲爆震发动机原理性试验结果以及数值模拟等。

我国航空、航天动力界许多领导、专家和同行对于我们的研究工作给予了大力支持和鼓励。我们的研究成果倾注着我校各级领导的关心,课题组成员的心血,也包含了许多研究生的努力,如刘军、何立明、汪林全、邓君香、闫朝、杜魁善、李牧、王丁喜、王治武、丁永强、李强等,博士生熊婉为本书的校对和修改做了大量工作,在这里谨向他们表示衷心的感谢。本书由严传俊、范玮、黄希桥、张群、郑龙席、邱华、李江红分工撰著,最后由严传俊统编



定稿。

非常感谢中科院院士、解放军装备指挥技术学院庄逢辰教授为本著作写序,清华大学傅维标教授审阅了本书,并提出了许多重要的修改意见。根据他们的意见,著者作了认真的修改和补充。

相对于现有的航空宇航推进系统,脉冲爆震发动机尚处于初期研究和发展阶段。研制出实际可用的脉冲爆震发动机尚面临着许多挑战和难题。本书内容仅是课题组研究工作的阶段小结,部分见解可能有一定的局限性。由于作者水平有限,错误或不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2004 年 10 月

主要符号表

A	爆震室横截面积	$q_{m,i}$	燃料的质量流量
A_e	发动机出口平面面积	$q_{m,O}$	氧化剂的质量流量
c	声速	N	表面单位法向矢量
c_2	爆震产物的声速	p	压力
c_p	比定压热容	p_3	推力壁压力
d	爆震室的内径	Δp_3	推力壁处的压差
e	总的内能	μ	动力黏性系数
E	单位反应物活化能, 弹性模量	p_0	环境压力
E	x 方向的对流通量矢量	q	单位质量反应物的释热率
f'	反应物燃料空气质量比	q_l	单位燃料热值
f	爆震循环频率	Q	守恒变量矢量
F_{avg}	平均推力	R	通用气体常数
F_{sp}	单位推力	r_e	密度比
F	y 方向的对流通量矢量	r_{O_2}	氧气的摩尔比
g	标准重力加速度	$r_{C_8H_{18}}$	辛烷的摩尔比
h	混合气体的总焓, 比焓	s	比熵
H	飞行高度	sf_c	单位燃料消耗率
H	源项矢量	S_e	出口平面
ΔH_r	反应焓	S_i	进口平面
$\Delta H_{f,i}$	各组分生成焓	S_w	其余表面
$\Delta H_{f,i}^\ominus$	第 i 种气体的标准生成焓	t	时间
I	比冲	t_{close}	阀门关闭时间
I_{sp}	混合物比冲	t_{cycle}	一个循环周期
I_{spf}	燃料比冲	t_{purge}	填充隔离气体时间
I_V	单位体积比冲	t_{refill}	填充时间
K	反应速率指前因子	T	温度
L	爆震室的长度	T_{dr}	爆震驱动区温度
L_{drive}	爆震驱动段长度	T_{tl}	总温
Ma	马赫数	u	轴向速度
		u	速度矢量



u_D	气相爆震波速	γ	比热比, 气体的绝热指数
$u_{D,s}$	两相爆震波速	ξ	无量纲参数
u_e	出口平面速度	ρ_0	起始混合物密度
U_{CJ}	C-J 爆震波速度	ϵ	膨胀比
v	径向速度	σ_s	拉伸屈服极限
v	比体积	σ_b	拉伸强度极限
V	爆震室的体积	σ_{-1}	弯曲疲劳极限
w	反应物质量分数	τ_{-1}	剪切疲劳极限
w_f	燃料质量分数	ω	反应物质量生成率
w_i	第 i 种组分的质量分数	φ	当量比
x_f	燃料摩尔分数	φ_f	燃料的体积分数
α	余气系数	π	隔离因子
β	填充因数	ψ	循环静温比

上下角标

C	控制体	refill	填充可燃混合气体
close	阀门关闭	∞	来流
cp	定压条件	0	环境参数, 初始参数
cycle	循环	1	未燃混合气体参数
D	爆震波	2	已燃混合气体参数
e	发动机出口平面	b	已燃气体
i	发动机进口平面	u	未燃气体
open	阀门打开	f	燃料
purge	填充隔离气体	$\ominus$	标准状态

缩略词

- PDE——Pulse Detonation Engine, 脉冲爆震发动机
 PDRE——Pulse Detonation Rocket Engine, 火箭式脉冲爆震发动机
 DDT——Deflagration-to-Detonation Transition, 爆燃向爆震转变
 C-J——Chapman-Jouguet 理想定常爆震波
 ZND——Zeldovich, von Neumann, Doring 提出的爆震波结构模型

目 录

第一章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 脉冲爆震发动机简介	4
1.3 脉冲爆震发动机的研究现状	9
1.4 脉冲爆震发动机研究面临的挑战	20
第二章 爆震的物理基础	23
2.1 引言	23
2.2 一维燃烧波分析	24
2.3 爆震波的特征	29
2.4 爆震波结构	39
2.5 爆震波的形成和传播	46
2.6 两相爆震波	52
第三章 脉冲爆震发动机结构形式	56
3.1 脉冲爆震发动机典型结构	56
3.2 脉冲爆震发动机分类	58
3.3 吸气式脉冲爆震发动机	62
3.4 火箭式脉冲爆震发动机	69
3.5 带旋转阀的脉冲爆震发动机	71
3.6 波转子脉冲爆震发动机	74
第四章 脉冲爆震发动机工作原理	78
4.1 引言	78
4.2 脉冲爆震发动机基本工作过程	78
4.3 吸气式脉冲爆震发动机工作原理	82
4.4 脉冲爆震发动机工作过程分析	94



第五章 脉冲爆震发动机热力循环与性能分析方法	122
5.1 引言	122
5.2 脉冲爆震发动机理想热力循环	125
5.3 非定常流推进系统性能分析模型	134
5.4 理想脉冲爆震发动机性能分析模型	138
5.5 考虑非定常排气过程的 PDE 性能模型	142
5.6 不带喷管的 PDE 单次爆震性能分析模型	151
5.7 带喷管的 PDE 性能分析模型	183
第六章 飞行状态下脉冲爆震发动机性能分析	185
6.1 引言	185
6.2 吸气式脉冲爆震发动机飞行状态	185
6.3 飞行状态下吸气式脉冲爆震发动机性能计算模型	187
6.4 算例及结果分析	192
6.5 与冲压发动机性能的比较	198
第七章 脉冲爆震发动机中燃料喷射、混合与起爆	211
7.1 引言	211
7.2 可爆震混合物的高速喷注与混合	211
7.3 爆震起爆	213
7.4 多相爆震燃烧	220
7.5 脉冲爆震波的自适应控制	223
第八章 脉冲爆震发动机概念设计	225
8.1 引言	225
8.2 脉冲爆震发动机总体设计	225
8.3 进气道	239
8.4 脉冲爆震发动机尾喷管	257
8.5 进气道与爆震室的界面	267
8.6 燃料及氧化剂供给系统	267
8.7 脉冲点火系统	268
8.8 脉冲爆震发动机结构强度	269