

《近代空气动力学丛书》

发射气体动力学

Gas Dynamics for Launch

苗瑞生 编著



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

发射气体动力学 Gas Dynamics for Launch

苗瑞生 编著

国防工业出版社

(北京市西城区黄蜂窝大街29号)

(邮政编码 100044)

南京印刷厂印刷

新华书店经销

2009年1月第1版 2009年1月北京第1次印刷
开本 850×1188 1/32 印张 13.87 333千字

字数: 1-25000 册 定价: 45.00元

国防工业出版社

发行部: (010) 6841273 总编室: (010) 6841274 发行部: (010) 6841273

发行部: (010) 6841273 总编室: (010) 6841274 发行部: (010) 6841273

图书在版编目(CIP)数据

发射气体动力学/苗瑞生编著. —北京:国防工业出版社, 2006. 1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-03787-7

I. 发... II. 苗... III. 航天器发射—气体动力学
IV. V525

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006648 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{3}{8}$ 333 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 42.00 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

京北发行业务: (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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植
顾问 黄宁
主任委员 刘成海
副主任委员 王峰 张涵信 张又栋
秘书长 张又栋
副秘书长 彭华良 蔡锺
委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(按姓名笔画排序) 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 陈火旺 侯正明 常显奇
崔尔杰 韩祖南 舒长胜

金基献出并图对译胡国
员人办国会员委审评国四第

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球

卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961年4月12日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于1969年7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的

第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

1999 年 9 月 9 日 庄逢甘 钱学森同志逝世十周年座谈会上的讲话

钱学森同志逝世十周年座谈会上的讲话

近代空气动力学丛书编辑委员会 组成人员

主任委员 庄逢甘

副主任委员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委员 (按姓氏笔画为序)

王承尧 王政礼 邓学莹 田震

乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岷生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋范 程厚梅

舒玮 童秉纲

会员委员会丛学代版户空升改

员人书

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,分离流与旋涡运动的结构分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等。丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每

一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

飞行器火箭、导弹、武器的发射是飞行器由静止状态点火、启动、加速,直到获得一定大小和方向的速度矢量,离开发射装置为止的整个运动过程。

飞行器的发射装置是用于放置飞行器、进行发射前准备并向给定方向实施飞行器发射的专用综合装置。发射装置按发射动力的类型可分为反作用力式、主动式、主动一反作用复合式和投放式等。

在发射过程中,高温高速气流与飞行器一发射装置系统发生相互作用,可产生多种气动载荷和效应。根据作用的机理和能量释放形式的不同,可分成:①非定常气动力载荷(射流的冲击、排导与反溅,引射、诱导与分离等产生的气动载荷);②冲击波效应(火箭发动机起动冲击波、火炮发射冲击波、发射管开启冲击波等);③气动声效应(发动机射流噪声、燃气发生器射流噪声、炮口射流噪声、射流自振噪声、湍流脉动噪声等);④气动热效应(激波、粘性湍流、噪声、射流自振引起的热交换和两相流热交换等)。

发射气体动力学的基本任务是通过计算、试验和工程分析,确定飞行器发射过程中作用在飞行器一发射装置系统上的气动载荷和效应的变化规律以及研究降低这些载荷和效应的方法。

发射气体动力学继承和应用了飞行器和气动机械(火箭发动机、引射器、涡轮机等)的许多经典气体动力学成果和方法。由于发射装置的多样性、工作环境的特殊性和发射流场的复杂性,使发射气体动力学的研究内容不断充实和发展,逐渐形成了一定特

色。

发射气体动力学计算一般包括两部分：①燃气射流计算；②射流与发射装置相互作用计算。根据不同的对象和专题，可采用不同近似程度的方程组和计算方法（一维的、轴对称的、边界层的、工程近似的以及欧拉方程和纳维尔—斯托克斯方程等），给出各类气动载荷和效应的分布和随时间的变化规律。

发射气体动力学试验一般包括两类：①缩比试验（单独作用模型）；②大尺度试验（模拟真实相互联系过程）。需要提供由模型换算到实物的相似律，解决有关的测试和数据采集与处理的技术问题。

《发射气体动力学》作为一本专著，主要是汇集、整理和系统阐述如何应用空气动力学一般理论和方法，解决各类飞行器和发射装置普遍遇到的典型发射气体动力学问题。当然，它不可能包容发射装置气动设计的所有工程实际问题，也不必要针对每一类飞行器和每一种发射装置论及所有的具体问题。

本书内容共分为5章。第1章为概述，根据发射装置的结构和使用条件，按机动性、导轨构型、发射动力、姿态、地点等进行分类，介绍了各种发射装置和典型飞行器（包括常规弹丸、无控火箭弹、反坦克导弹、机载导弹、防空导弹、舰载导弹、地—地战略导弹和运载火箭）的发射技术，分析了发射中出现的各种气动载荷和效应，说明了发射气体动力学的对象和任务。

第2章分析了气流变化与扰动波的关系，阐述了特征线法在一维非定常流动（包括等截面、变截面管流；柱对称、球对称流；均熵、非均熵流；有粘性摩擦和温度变化的流动等）和二维定常超声速流动（包括平面、轴对称流；无旋、有旋流；均熵、非均熵流等）中的应用以及流场中各种间断面（包括正激波、斜激波；柱面激波、球面激波等）和接触面（切向速度间断、温度间断、熵间断等）的变化，介绍了应用特征线法计算火炮膛内和火箭发射管内流动的典型示例。

第3章讨论了近壁粘流与自由射流，说明了粘流的基本特性，

给出了附面层方程(包括低速、高速流;微分、积分形式)和平板层流与湍流附面层典型解,介绍了各种形态的分离流动。对于低速自由湍流射流,给出了直匀流混合边界层、二维狭缝射流和孔口射流的理论解。对超声速喷管射流,从工程分析和计算的角度,依次介绍了欠膨胀与过膨胀轴对称射流初始段、过渡段和基本段的工程计算方法。

第4章进一步研究了喷管射流与膛口射流的精细数值模拟,给出了采用三维 N-S 方程、 $k-\epsilon$ 湍流模型、多组分化学反应律、三阶有限体积 ENO 格式、四阶 Runge-Kutta 和 LU 分解法,对燃气射流进行数值模拟的结果,包括轴对称层流与湍流射流、非定常射流、有伴随流的射流、多喷管射流、斜切喷管射流、有化学反应的射流、喷管流与射流一体化等的典型示例。还介绍了火炮膛口射流与膛口焰、爆炸冲击波的计算和采用欧拉方程和 MUSCL 迎风格式对膛口流场进行数值模拟的结果。

第5章为射流的冲击、排焰与导流,给出了低速自由射流冲击运动的理论结果;分析了高速射流的正冲击与斜冲击运动,给出了射流对楔形导流器、单面与双面导流槽和地下井发射装置的冲击与导流的典型示例;阐述了多级火箭分离时的射流冲击、多管火箭发射时的射流冲击、机载导弹发射时的射流冲击、舰载导弹发射时的排焰导流、排导装置中的声与非声振荡等专题。

本书是在近代空气动力学丛书编辑委员会,特别是庄逢甘院士和张涵信院士的指导和鼓励下编著出版的,可供航天、航空和兵器系统从事火箭、导弹和常规武器研制与发射工作的科技人员借鉴参考,也可供高等院校飞行器系统工程、推进与发射专业研究生与高年级本科生学习使用。

中国兵器第203所蒋范研究员和北京航空航天大学吴颂平教授对书稿进行了认真评审,提出了许多宝贵意见。中国航天14所王瑞铨研究员和北京理工大学袁曾风教授对本书编写给予了热情帮助。书稿中反映了西北工业大学姜正行教授,北京理工大学徐文灿教授、黄振宇博士,南京理工大学张福祥教授、马大为教授、武

晓松教授、鞠玉涛副教授、李军博士、哈尔滨工程大学部冶教授等的研究成果,在此一并表示诚挚的感谢。迄今为止,尚未见到有同名著作公开出版。由于是首次尝试,在书稿内容选择和编排格式上,难免有失误和不当之处,敬请读者不吝指正。

作者

目 录

主要符号表	1
第 1 章 发射气体动力学概述	5
1.1 飞行器的发射装置	5
1.1.1 机动性	6
1.1.2 导轨类型和数量	6
1.1.3 发射动力	7
1.1.4 发射姿态	9
1.1.5 发射地点	11
1.2 典型飞行器的发射技术	14
1.2.1 常规弹丸的发射	14
1.2.2 火箭弹的发射	16
1.2.3 反坦克导弹的发射	18
1.2.4 机载导弹的发射	19
1.2.5 防空导弹的发射	20
1.2.6 舰载导弹的发射	20
1.2.7 地—地战略导弹和运载火箭的发射	22
1.3 发射气体动力学的对象	24
1.3.1 发射中的气体动力学载荷和效应	25
1.3.2 发射气体动力学计算方法	26
1.3.3 发射气体动力学典型试验装置	27
第 2 章 气体流动与扰动波	31
2.1 基本方程	31

2.1.1	状态方程	31
2.1.2	连续方程	32
2.1.3	动量方程	33
2.1.4	能量方程	35
2.1.5	初始条件和边界条件	37
2.2	相似准则	38
2.2.1	相似性流动	38
2.2.2	相似性判据	39
2.3	喷管中的定常等熵流动	41
2.3.1	定常等熵流动气体动力学函数	41
2.3.2	拉瓦尔喷管内流动与外界环境 压强的关系	45
2.3.3	气体在喷管中的轴对称流动	47
2.4	特征线方法	49
2.4.1	两个方程情况	49
2.4.2	三个方程情况	55
2.5	一维非定常流动	57
2.5.1	微幅波运动	57
2.5.2	一维均熵非定常流动	60
2.5.3	一维非定常非均熵流动	72
2.5.4	有粘性和温度变化的一维非定常流动	75
2.6	一维激波运动	79
2.6.1	激波的分类	79
2.6.2	右传激波	81
2.6.3	左传激波	84
2.6.4	激波의相交和反射	85
2.7	二维超声速定常流动	91
2.7.1	平面超声速定常均熵位流	91
2.7.2	轴对称超声速定常均熵位流	96
2.7.3	平面超声速定常有旋流动	100