

计算内弹道学

Computational Interior Ballistics

翁春生 王浩 著

图书在版编目(CIP)数据

计算内弹道学 / 翁春生, 王浩著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 1

ISBN 7-118-04201-3

I. 计... II. ①翁...②王... III. 内弹道学-计算
IV. 0315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 120770 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 14½ 字数 358 千字
2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 45.00 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

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。

IV

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 第五届评审委员会组成人员

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	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓名笔画排序)	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			

序

内弹道学是研究枪炮膛内射击现象及其规律的科学,是武器弹药系统设计的理论基础。和其他学科一样,对它的研究通常采用理论分析、实验研究和数值模拟这三种主要方法。目前,国内有关偏重于内弹道学理论或实验的教科书出版较多,但有关数值模拟和计算方法的专著或教材尚未见到公开出版。由翁春生和王浩两位教授合著的《计算内弹道学》填补了这方面的空白。它的公开出版发行对内弹道学在工程应用领域中的发展有着重要的现实意义。理论分析、实验研究和数值模拟这三者之间是相互渗透和相辅相成的。毫无疑问,《计算内弹道学》除确立自身学科以外,还将在某些方面弥补理论和实验研究的不足,促进内弹道学理论进一步完善和新的的发展。

枪炮膛内射击过程是一个十分复杂的物理化学过程,它涉及到伴随化学反应的、非稳态的、多维多相流体力学问题。因此,反映膛内射击过程的数学模型是一组非线性偏微分方程,很显然,这类方程通常得不到分析解。即使在经典内弹道学范畴,它的数学表现形式是一组常微分方程,也只能在一些简化条件下才能获得分析解,如 l_{ψ} 平均解法等。倘若用手工来计算,也得需要数小时才能计算出一个方案 l_{ψ} 平均解的数值结果,而在武器弹药系统设计当中,需要计算方案是很多的。因此,弹道工作者不得不付出极大的精力去进行这种乏味而繁杂的计算工作。为了解决弹道的计算问题,美国弹道研究所研制出世界上第一台电子计算机。随着电子计算机技术的发展,弹道工作者才从冗长的计算中解放出来。有了电子计算机,还需要与此相匹配的数值计算的理论和方法,才能得到可靠的数值结果。《计算内弹道学》一书在内弹道学理论

和计算机科学之间架起了一座桥梁,形成了一门在内弹道学理论、数值计算和计算机科学基础上的边缘学科。

《计算内弹道学》不仅系统地阐述常规兵器和新概念非常规兵器以及不同装药结构条件下的内弹道数学模型,而且系统和深入地讨论数值计算的理论和方法,尤其在瞬态气固与气液两相反应湍流的理论模型和数值计算以及冲压爆轰与脉冲爆轰的数值模拟等方面独具特色。在差分格式方面,除了介绍在计算内弹道学中常用的 Lax-Wendroff、MacCormack、TVD、ALE、SIMPLE 等算法以外,还详细地介绍了目前国际上最新流行的 CE/SE 计算格式,这是近几年来才发展起来的一种求解强间断最有效的方法之一。作者用了较大的篇幅阐述了 CE/SE 方法,并给出用该方法在脉冲爆轰数值计算中的应用。纵观本书的内容,基本上涵盖了经典内弹道学和现代内弹道学数值计算的内容。不少章节的内容反映出我国在该领域研究的最新动态,其中也包括作者近几年来在教学和科研中的新成果。从总体上看,本书反映了我国在该领域中的研究水平。

该书是一本学术专著,也可作为研究生的教材。专著编撰和教材建设是国民教育的重要基础建设之一,是一项教育和提高国民素质的伟大工程。我们的先哲孔子晚年专心整理《诗》、《书》、《礼》、《易》、《乐》和《春秋》等六经,使中华文明的精华,我国最宝贵的原典得以流传千古,播扬海外。在科学技术日新月异发展的今天,每位科学技术工作者也有责任把自己毕生研究的成果撰写成教材或专著,留给后人,也是对社会进步和人类文明作出一份贡献。写书是要付出极大心血的,要有耐得起“写罢一卷头飞雪”的劳神。这不是“点干了自己,照亮了别人”的蜡烛精神吗?为此,我对两位年轻的教授所付出的辛勤劳动表示敬意。

金志明

于南京理工大学

前 言

计算内弹道学是在现代内弹道学、计算流体力学与计算机科学的基础上发展起来的一门交叉学科。它的研究对象为火炮射击过程中的内弹道现象及其变化规律,其研究方法为数值计算方法。因此,计算内弹道学孕育于现代内弹道学,成长于计算流体力学,实现于现代计算机技术,是三者结合的必然产物。

与传统方法相比,数值模拟方法在火炮内弹道设计与装药设计中具有其特有的作用。传统的方法主要靠大量的火炮射击试验来确定装药设计的方案。这种试验工作量大,耗费大量的人力、物力和财力,并且有些试验难以实现,比如模拟火炮膛炸的试验。数值模拟为研究火炮内弹道过程提供了新手段。在计算程序中改变装药结构、点传火条件、火药种类等参量比在试验中改变这些参量要容易得多,而且还可以模拟出一些极端条件的射击结果。在确定方案阶段,可先运用数值模拟方法对每个方案进行计算,比较不同方案的优劣,对方案进行初选。在试验阶段,可取代一部分的静态试验、模拟试验以及全尺寸射击试验。当然,数值模拟方法有它的局限性。首先,数学模型不能刻划膛内所有的现象,只能反映内弹道循环过程的主要现象;其次,受计算机性能的限制,数值模拟只能用有限个的离散点来描述实际的连续过程。因此,数值模拟结果要经受试验的检验。但总的来讲,数值模拟具有省钱、省时的优点,可减少试验次数,节省大量的弹药,少走不必要的弯路,缩短研制周期。

以固体发射药为能源的身管武器为例,内弹道过程包括:点火

传火、火药燃烧、弹后空间的火药气体状态的变化、弹丸在膛内的运动规律、火药气体与弹药和身管之间的相互作用等。内弹道循环过程持续的时间极短,通常为十多毫秒,而膛压由常压陡升到数千个大气压,弹丸与气流由静止状态加速到每秒一千多米。可见,火炮膛内循环过程是高温、高压、高速与瞬变的两相流动与燃烧的过程,这就给计算内弹道学的研究带来很大的困难。首先,内弹道过程异常复杂,涉及两相流动力学、燃烧学、化学动力学、传热学、湍流力学、爆轰学等诸多学科中的很多问题,要建立一套能够描述内弹道过程的理论模型就很困难。其次,内弹道循环过程中存在多种物理间断问题,比如爆轰波、激波、火焰波以及传火孔高速射流等。对于一些复杂的装药结构,膛内物理量的初始装填条件是不连续的,比如药筒间的间隙以及弹后自由空间,这些不连续形成空间上强间断面。这些物理间断与空间间断给差分方法的应用带来了很大的挑战。第三,火炮膛内的边界条件异常复杂。不仅有几何形状复杂的弹丸尾翼或弹丸船形部,而且弹丸在膛内做高速运动,计算域不断增加,形成所谓的运动边界条件。这就给边界条件的处理造成很大的困难。第四,在内弹道循环过程中还会出现一些异常的现象,比如大振幅压力波动、火药破碎、燃烧转爆轰问题等。这些异常现象给数值模拟带来很大的问题。第五,随着新概念武器的不断出现,计算内弹道学的研究内涵也不断扩大,不再局限于固体发射药火炮的气固两相反应湍流问题。比如,液体发射药火炮的内弹道过程就是典型的气液两相流问题,液体发射药电热化学炮的内弹道过程就是典型的气体—液体—等离子体相互作用的过程,固体发射药电热化学炮就是典型的气体—固体—等离子体相互作用的过程,冲压加速发射为典型的多组元混合气体的爆轰问题。这些新出现的问题,要求计算内弹道学要不断拓展新的研究领域。

作者试图将计算流体力学的一些最新成果应用于现代内弹道

学中,从而形成一门新的学科——计算内弹道学。本书具有以下的特点:(1)系统性。本书系统地论述了内弹道数值计算的多个方面,其内容基本上涵盖了内弹道数值计算的绝大部分内容。(2)新颖性。本书中很多章节的内容基本上反映国内在该研究领域的最新成果。全书基本上反映了我国内弹道数值计算的最新动态。(3)实用性。本书中的模型建立、数值求解方法都是为解决工程实际问题而提出来的,给出的示例本身就是工程实际问题,具有代表性。这样,只需稍做修改就可将相关内容用于解决其他工程实际问题。(4)完整性。本书不同于一般的计算流体力学的编排,只介绍计算方法,不介绍理论模型。本书根据不同研究对象的内弹道循环过程的特点,建立了相应的物理模型与数学模型,然后再根据数学方程的性质,介绍其数值求解方法,最后一般给出了典型的示例,这样有利于读者对内弹道数值模拟方法有一个完整的了解。

随着内弹道理论的不完善、计算流体力学的不断发展以及计算机性能的不断提高,人们对内弹道数值仿真技术更加重视。美国从20世纪70年代末就开始研究火炮内弹道的两相流数值模拟方法。从20世纪的80年代至20世纪末,先后完成了一维两相流内弹道的仿真软件NOVA编码,二维两相流内弹道的仿真软件TDNOVA编码,以及考虑火药破碎的两相流内弹道仿真软件XK-TC编码。这些编码在北约成员国内广泛使用,在提高装药安全性、火炮验收试验、新火炮设计以及已有火炮的改造方面发挥了重要的作用。我国从80年代才开始这方面的研究,经过20年的努力,取得了很多成果,特别在数学模型以及数值模拟方法方面达到目前国外的研究水平,建立起有自己特色的内弹道仿真技术,这些软件系统在有关兵工厂与科研所得到的广泛的推广应用。目前,有关内弹道计算的文献资料非常多,但国内外还没有一本系统论述计算内弹道的专著。因此,本书的出版,无论对于促进弹道理论的

发展,还是对于推广数值仿真技术的应用,都具有一定的意义。

全书共分八章。**第一章**是经典内弹道计算。建立了经典内弹道的理论模型,对单一装药、混合装药、随行装药的内弹道模型采用 Runge-Kutta 方法进行了数值求解。**第二章**是经典内弹道设计。介绍了经典内弹道设计的方法和步骤,同时对不同类型火炮的内弹道设计特点进行了分析。**第三章**是火炮膛内双一维两相流内弹道计算。根据复杂装药结构的特点,建立了火炮膛内装药床与点火管以及可燃药筒耦合的双一维两相流内弹道模型,讨论了不同装药结构下的初始条件与边界条件。介绍了 Lax-Wendroff 格式, MacCormack 格式, 一维 TVD 格式, 以及目前国际上最新的格式——CE/SE 方法。对双一维耦合的两相流内弹道方程进行数值求解,给出了一些典型的示例。本章最后还对火药破碎建立了“颗粒床受挤—火药破碎—增面燃烧—异常压力”的理论模型,并给出了火药破碎对内弹道性能影响的数值模拟结果。**第四章**为管状发射药两相流内弹道计算。对开槽管状药、未开槽管状药以及管状药与粒状药组成的混合装药进行内弹道计算。**第五章**为火炮膛内多维两相流内弹道模型及其计算。采用双流体模型,建立了火炮内弹道过程的反应粘性两相流方程组。根据膛内流动与燃烧的特点,构造了 $k-\varepsilon-k_p$ 、 $k-\varepsilon-A_p$ 和 $k-\varepsilon$ -PDF 气固两相反应湍流模型以及大涡模拟方法。对无粘两相流内弹道方程组的类型进行理论分析,为数值求解提供依据。针对多维两相流内弹道方程的特点,介绍了求解该方程组的数值计算方法。本章最后给出了轴对称与三维两相流内弹道的算例。**第六章**为爆轰的数值计算。爆轰数值计算要求计算方法能够捕获爆轰波等强间断,因此其计算方法的研究尤为重要。本章分为三部分。第一部分为火药颗粒床燃烧转爆轰的计算,主要介绍自适应网格方法;第二部分为冲压加速推进的数值模拟,给出了非反应流与多组元反应流的有限体积 TVD 格式;第三部分为脉冲爆轰的数值计算,着重介绍

CE/SE 方法。CE/SE 方法是继 TVD 格式之后,国外最近几年才发展起来的一种求解强间断最有效的方法之一。为了使读者对 CE/SE 方法的基本思想有较深入的了解,本章用较大的篇幅推导了 CE/SE 方法。本章最后给出了 CE/SE 方法在脉冲爆轰数值计算中的应用,这些示例基本上涵盖了脉冲爆轰的主要内容。第七章为气液两相流内弹道数值模拟。根据再生式液体发射药火炮与液体发射药电热化学炮的内弹道循环特点,分别建立了这两种新型火炮的气液两相反应湍流理论模型。两相反应湍流的计算是计算流体力学的前沿课题。对于再生式液体发射药火炮的内弹道过程中的喷射燃烧流动问题,其流动区域不规则,且具有两个与流动及燃烧反应强烈耦合的运动边界,我们采用 ALE 法(任意拉格朗日—欧拉法)数值求解;对于液体发射药电热化学炮的内弹道循环过程,不仅有液体的卷积与雾化,而且还有与等离子体的强烈作用,我们采用协调一致的 SIMPLE 方法求解。本章最后对这两种新型火炮的内弹道循环过程进行数值模拟结果分析。第八章为内弹道特殊问题的数值计算,主要分为四部分。第一部分为固体发射药随行装药的两相流内弹道计算。建立了随行装药的内弹道方程组,推导了随行装药结构的运动边界条件,给出了算例;第二部分为火炮内膛壁面边界层与壁温的数值计算。建立了湍流边界层方程组,构造了与核心流耦合的求解边界层的离散格式,预测了边界层内物理量分布与壁温分布规律;第三部分为激光点火过程的数值计算。建立了激光点火过程的二维固相模型与一维气相模型,并分别用 Peaceman-Rachford 与 Crank-Nicolson 差分格式数值求解,对激光点火过程的影响因素做了较详细的分析;第四部分为火药随机燃烧规律对内弹道性能影响的计算。建立了经典内弹道的随机模型,并对模型的求解方法进行了分析。

本书的第一章、第二章由王浩撰写,第三章至第八章由翁春生撰写,全书由翁春生审阅和定稿。在编写过程中,得到南京理工大

学金志明教授的热情关怀和帮助。金老师在百忙中审阅了书稿,提出了许多宝贵的意见,并为本书撰写了序言,没有金老师的鼓励和支持,本书难以完成。值此本书完稿之际,作者衷心感谢金老师。感谢装备技术指挥学院院长、将军常显奇教授,他认真细致审阅了书稿,并提出许多宝贵的意见。感谢南京理工大学李鸿志院士与军械工程学院于永利教授的支持和推荐,他们在百忙中审阅了初稿。书中引用了大量的国内外文献,有些素材直接来源于国内外学者们的研究成果,在此对原作者表示谢意。感谢唐应恒编审,她为本书的出版付出了辛勤的劳动。

由于水平有限,书中缺点甚至错误难免,敬请读者提出批评,以便改正。

翁春生
于南京理工大学

目 录

第一章 经典内弹道计算	1
1.1 单一装药内弹道数学物理模型	2
1.1.1 基本假设	2
1.1.2 火药形状函数	3
1.1.3 火药燃烧速率公式	6
1.1.4 火药燃气状态方程	7
1.1.5 弹丸运动方程	9
1.1.6 次要功及次要功计算系数的计算	10
1.1.7 内弹道能量守恒方程	12
1.1.8 膛内火药气体运动及压力分布	13
1.1.9 单一装药内弹道方程组	15
1.2 混合装药内弹道数学物理模型	16
1.2.1 基本假设	16
1.2.2 内弹道方程组	17
1.3 内弹道方程组数值求解方法	18
1.3.1 一阶精度数值求解方法	18
1.3.2 四阶精度龙格—库塔(Runge-Kutta)方法	19
1.3.3 特殊点的计算方法	19
1.3.4 内弹道参数符合计算方法	22
1.4 算例	23
1.4.1 单一装药内弹道算例	23
1.4.2 混合装药内弹道算例	25
1.5 随行装药经典内弹道计算	28
1.5.1 随行装药内弹道过程的物理描述	28

1.5.2	基本假设	29
1.5.3	内弹道数学模型	30
1.5.4	计算举例	32
1.5.5	几种不同的弹后压力分布假设	36
	参考文献	38
第二章	经典内弹道设计	39
2.1	引言	39
2.2	内弹道设计方案评价标准	40
2.3	内弹道设计步骤	42
2.3.1	起始参量的选择	42
2.3.2	内弹道方案的计算步骤	43
2.3.3	算例	46
2.4	几种典型武器内弹道设计特点	49
2.4.1	加农炮内弹道设计的特点	49
2.4.2	榴弹炮弹道设计的特点	50
2.5	内弹道优化设计	54
2.5.1	优化设计的目的	54
2.5.2	优化设计步骤	55
2.5.3	应用举例	59
	参考文献	63
第三章	火炮膛内双一维两相流内弹道计算	64
3.1	引言	64
3.2	一维气固两相流内弹道方程组	65
3.2.1	基本假设	65
3.2.2	守恒方程组	65
3.2.3	方程组类型	67
3.3	辅助方程	71
3.3.1	相间阻力	72
3.3.2	相间热交换	73
3.3.3	状态方程	74

3.3.4	火药燃烧速率	74
3.3.5	形状函数	75
3.3.6	颗粒间应力	75
3.3.7	火药表面温度	76
3.4	一维非定常可压缩流的计算方法	77
3.4.1	Lax-Wendroff 格式(L-W 格式)	77
3.4.2	Mac Cormack 差分格式	79
3.4.3	一维 TVD 差分格式	79
3.4.4	一维 CE/SE 方法	85
3.5	初边条件与人工粘性	90
3.5.1	初始条件	90
3.5.2	膛底边界条件	91
3.5.3	弹底运动边界	92
3.5.4	人工粘性	94
3.6	点火管两相流计算	95
3.6.1	点火管内流动与燃烧过程的物理描述	95
3.6.2	点火管内两相流守恒方程组	96
3.6.3	点火源流量与传火孔流量	97
3.6.4	常规金属点火管数值计算	98
3.6.5	多点引燃点火管数值计算	100
3.6.6	烟火双层点火管数值计算	101
3.6.7	喷管点火管数值计算	104
3.7	底部点火装药结构一维两相流内弹道计算	108
3.7.1	底火与点火药包的流量	108
3.7.2	网格自动生成技术	110
3.7.3	数值计算结果及其分析	110
3.8	中心点火管装药结构双一维两相流内弹道计算	113
3.8.1	双一维两相流内弹道基本方程	113
3.8.2	可燃药筒与其他点火元件的方程	115
3.8.3	单一粒状药双一维两相流内弹道计算	117

3.8.4	混合粒状药双一维两相流内弹道计算	120
3.8.5	TVD 格式与 Mac Cormack 格式计算结果比较	122
3.9	火药破碎对膛内压力异常影响的数值模拟	123
3.9.1	火药破碎度及其实验拟合关系式	123
3.9.2	火药破碎理论模型	125
3.9.3	火药破碎的计算结果及其分析	126
	参考文献	130
第四章	管状发射药两相流内弹道计算	133
4.1	引言	133
4.2	未开槽管状药两相流内弹道计算	134
4.2.1	基本假设	134
4.2.2	基本方程	135
4.2.3	主要辅助方程	138
4.2.4	计算方法	139
4.2.5	计算结果及其分析	140
4.3	开槽管状药两相流内弹道计算	143
4.3.1	形状函数	143
4.3.2	基本假设	145
4.3.3	基本方程	145
4.3.4	主要辅助方程	146
4.3.5	计算结果及其分析	147
4.4	管状药与粒状药组成混合装药的两相流内弹道 计算	149
4.4.1	基本假设	149
4.4.2	基本方程	149
4.4.3	152mm 榴弹炮计算结果及其分析	152
	参考文献	155
第五章	火炮膛内多维两相流内弹道模型及其计算	157
5.1	引言	157
5.2	多维两相流内弹道基本方程	158