



国家出版基金项目

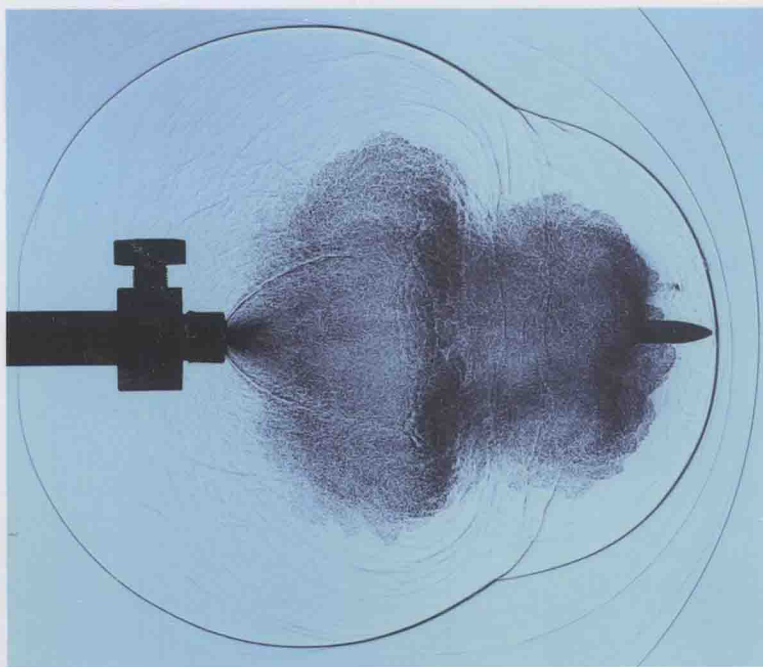


国防特色院士文库

中间弹道学

INTERMEDIATE BALLISTICS

李鸿志 姜孝海 王 杨 郭则庆◎著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目

国家出版基金项目



国防特色院士文库

中间弹道学

INTERMEDIATE BALLISTICS

李鸿志 姜孝海 王 杨 郭则庆◎著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

中间弹道学是弹道学最年轻的学科分支,主要研究身管武器发射过程中,弹丸穿越膛口流场时的受力状况、运动规律,以及伴随膛内火药燃气排空过程发生的各种现象(中国大百科全书)。本书主要内容包括:膛口流场特性与物理模型、火药燃气后效期理论、膛口装置气体动力学、膛口冲击波动力学、膛口气流脉冲噪声、膛口焰燃烧动力学、弹丸的后效作用、膛口流场数值计算、膛口制退器优化设计、膛口气流危害控制原理、中间弹道学实验研究等 11 章。

本书是一本全面介绍中间弹道学学科体系、学术内涵的学术专著。书中详细介绍了实验规律、机理分析、理论方法评价和数值计算实例。以应用为目的,为武器设计与安全防护提供弹道学基础。

本书的主要特色:

——在总结、借鉴、评价近半个世纪的中间弹道学各种经典理论成果的基础上,重点探索数值模拟为主的近代理论,以逐步取代经典理论计算方法,并自主完成了本书全部数值计算算例;

——充分发挥实验研究的图像可视、机理清晰的优点,利用自研的瞬态高速流场显示、光谱测温、激光测速和高空流场模拟等新手段,自主完成了全书的试验图例。

本书可作为兵器、航空、航天、船舶等涉及发射与气流危害、安全控制学科的研究生、科技人员教学参考书,也可作为研究复杂流场测量与计算的有关领域提供参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

中间弹道学/李鸿志等著. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-5682-0004-2

I. ①中… II. ①李… III. ①中间弹道学 IV. ①O315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 288971 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)
82562903(教材售后服务热线)
68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

刷 印 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 27.25

字 数 / 527 千字

版 次 / 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 150.00 元

责任编辑 / 樊红亮

王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

自序

“中间弹道学是研究身管武器发射过程中，弹丸穿越膛口流场时的受力状况、运动规律，以及伴随膛内火药燃气排空过程发生的各种现象的学科，是弹道学的一个分支。”——《中国大百科全书》《中国军事百科全书》。

(一)

中间弹道学是弹道学中诞生最晚的新学科，早期属于内弹道学。20世纪60年代后，随着武器需求的日益迫切与学科内涵的不断充实，逐渐独立成为弹道学的一个分支。半个世纪以来，作为一门应用基础学科，中间弹道学经历了起步、发展、低潮、再发展的历史过程。20世纪60年代至90年代初是它的快速发展期，其中，以美国陆军弹道研究所（BRL）、德国恩斯特—马赫研究所（EMI）和中国弹道研究所为代表，开展了系统的研究工作，为中间弹道学的理论和实验体系的建立以及经典理论的完善起到了奠基的作用。

进入20世纪90年代中期后，由于新军事变革对武器需求的变化以及自身理论与方法的不适应，中间弹道学经历了一段低潮期。近年来，依托计算机技术和大规模数值计算方法的应用，以建立中间弹道学的现代理论与精确方法为目标，研究工作又重新活跃起来。

(二)

我是1960年9月开始从事中间弹道学的科研工作的（当时“中间弹道学”一词在科研管理中尚未使用），至今已54年了，亲身经历了我国中间弹道学起步和发展的全过程。在1963—1993年的30年快速发展期，在专业发展方面，我将主要精力都用于中间弹道学的科研、实验室与学科建设工作。

目 录

绪论	1
第一节 中间弹道学的学科内涵	1
第二节 中间弹道学的研究内容与研究方法	7
第一章 膛口流场特性与物理模型	10
第一节 膛口流场结构	10
第二节 初始流场	13
第三节 火药燃气流场	25
第四节 膛口气流脉冲噪声场	41
第五节 膛口装置流场	46
第六节 远场膛口冲击波	53
第七节 膛口流场物理模型	53
第二章 火药燃气后效期理论	58
概述	58
第一节 后效期炮膛流空过程理论	59
第二节 后效期炮(枪)膛受力	62
第三节 炮(枪)膛流空过程数值模拟	66
第四节 后效期经典理论分析	71

2 中间弹道学

第三章 膛口装置气体动力学	75
概述	75
第一节 膛口装置工作原理	76
第二节 膛口装置的受力分析	87
第三节 膛口装置内气体流动	90
第四节 膛口装置数值模拟	101
第四章 膛口冲击波动力学	106
概述	106
第一节 膛口冲击波物理模型	107
第二节 带膛口装置的膛口冲击波场	111
第三节 膛口冲击波场的计算方法	126
第四节 远场膛口冲击波	131
第五节 航炮膛口冲击波	134
第六节 无后坐炮、迫击炮膛口冲击波	147
第五章 膛口气流脉冲噪声	156
概述	156
第一节 气动声学理论简述	156
第二节 计算气动声学简介	160
第三节 膛口气流脉冲噪声的计算实例	162
第六章 膛口焰燃烧动力学	169
概述	169
第一节 膛口焰气体动力学与膛口流场	173
第二节 膛口焰化学动力学与湍流燃烧	179
第三节 膛口反应流数值计算	185
第四节 带膛口装置的膛口焰形成机理	189
第五节 膛口焰抑制方法	199

第七章 弹丸的后效作用	203
概述	203
第一节 弹丸在后效期的加速运动	204
第二节 尾翼稳定脱壳穿甲弹后效作用的气动力原理	209
第三节 脱壳过程数值计算	229
第四节 膛口装置对脱壳穿甲弹散布的影响	234
第八章 膛口流场数值计算	239
概述	239
第一节 膛口非反应流计算	239
第二节 膛口反应流计算	249
第三节 气动脉冲噪声计算	252
第九章 膛口制退器优化设计	259
概述	259
第一节 膛口制退器优化设计内容	262
第二节 膛口制退器相似律及模拟实验方法	264
第三节 膛口制退器优化设计方法	269
第十章 膛口气流危害控制原理	273
概述	273
第一节 膛口压力波危害性质	275
第二节 膛口冲击波、脉冲噪声生理损伤机理	279
第三节 膛口冲击波、脉冲噪声安全标准	283
第四节 发射安全控制原理	288
第十一章 中间弹道学实验研究	292
概述	292
第一节 膛口流场显示系统	293
第二节 膛口冲击波场压力测量	303
第三节 膛口气流速度测量	312

4 中间弹道学

第四节	膛口气流温度测量	320
第五节	后效期参数及膛口装置效率测量	326
第六节	中间弹道靶道测量	328
附录		335
附录一	冲击波与脉冲噪声的基本概念	335
附录二	气体射流有关知识	343
附录三	火药燃气作用系数 β 的经典计算方法	348
附录四	炮膛流空的特征线数值计算方法	352
附录五	膛口装置效率的理论计算方法	357
附录六	膛口装置冲击波场的理论计算方法	366
附录七	计算流体力学简述	372
附录八	作者本人相关文献	385
参考文献		391
索引		394

绪 论

第一节 中间弹道学的学科内涵

一、中间弹道学的定义

中间弹道学是研究身管武器发射过程中，弹丸穿越膛口流场时的受力状况、运动规律，以及伴随膛内火药燃气排空过程发生的各种现象的学科。它是弹道学的一个分支学科。

弹道学是研究各种弹丸或其他发射体从发射开始到终点的运动规律及伴随发生的有关现象的学科。根据发射过程的性质，弹道学分为 5 个弹道阶段，形成了相应的学科分支：起始弹道学、膛内弹道学（简称内弹道学）、中间弹道学、膛外弹道学（简称外弹道学）和终点弹道学。在弹道学科体系中，中间弹道学是最年轻的一支，20 世纪 60 年代以后才从内弹道学中分离出来形成独立学科。

在弹道学的各阶段中，中间弹道段是从弹丸出膛口（即内弹道段结束）开始，到膛内火药燃气排空为止，总时间等于火炮（枪）的火药燃气后效期时间（用 τ 表示）。其中，对弹丸的后效作用时间（用 t_d 表示）要短很多。而外弹道段的起点是弹丸后效期结束，自由飞行开始时。因此，中间弹道段与外弹道段有交叉（图 0-1）。

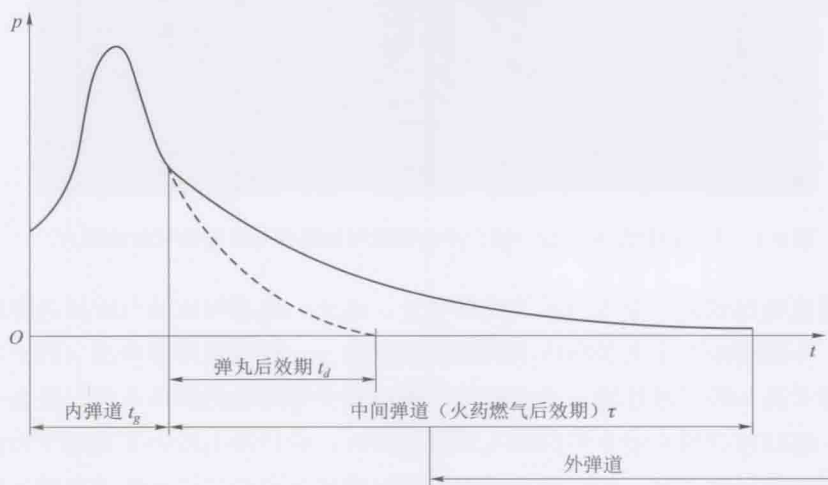


图 0-1 中间弹道所处的弹道阶段

二、发射现象与中间弹道学的研究对象

自火炮（枪）发射开始，弹丸在膛内运动过程中，不断地推动和压缩弹前的空气柱（以空气为主，含少量泄漏的火药燃气），逐步形成了1~2个跟随弹丸一起运动的弹前激波，其波阵面压力最高可达3 MPa。这个以弹前激波为先导的空气柱在出膛口后，在膛口外形成了1~2个初始冲击波与初始射流组成的膛口初始流场。当弹丸出膛口时，火药高压燃气突然溢出，在初始流场内形成了比外界压力大数百倍的膛口火药燃气冲击波波阵面和紧跟其后的高压火药燃气流，由于其膨胀速度超过弹丸速度，很快包围弹丸并冲垮初始射流，形成了火药燃气射流特有的典型瓶状激波结构。同时，火药燃气冲击波继续膨胀，很快追赶上外层运动的初始冲击波，二者合二为一，形成独立发展的、波阵面形状逐步呈稳定球形的空气冲击波——膛口冲击波。严格地说，膛口冲击波是指膛口区域运动的各个冲击波的总称，包括几个初始冲击波和火药燃气冲击波。膛口冲击波波阵面以超声速向外膨胀（图0-2），其冲击波压力不断衰减，最后蜕化为脉冲噪声波。



图0-2 大口径舰炮齐射时，膛口冲击波球形波阵面与火药燃气射流照片^[1]

自初始流场形成起，至火药燃气流排空止，高压、高速射流及与固体边界和冲击波相互作用，不间断地产生大量强度不同的弱扰动波——膛口脉冲噪声波（图0-3）。

膛口冲击波和膛口脉冲噪声波在向外传播过程中对阵地的操作人员与装备有危害作用。其中，膛口脉冲噪声波主要损伤人的听觉器官；膛口冲击波由于其超压较高，不仅严重损伤射手的听觉器官，而且对人的内脏和运载平台也造成严重的冲击破坏作用。这是膛口气流的主要负效应之一。膛口火药燃气流是膛内火药负氧燃烧的可燃气流，在膛

口外与空气混合后,可能被点火而再次燃烧产生明亮的膛口焰(图 0-4),若发生爆燃转爆轰,将引起二次冲击波。这是膛口气流的另一个负效应。

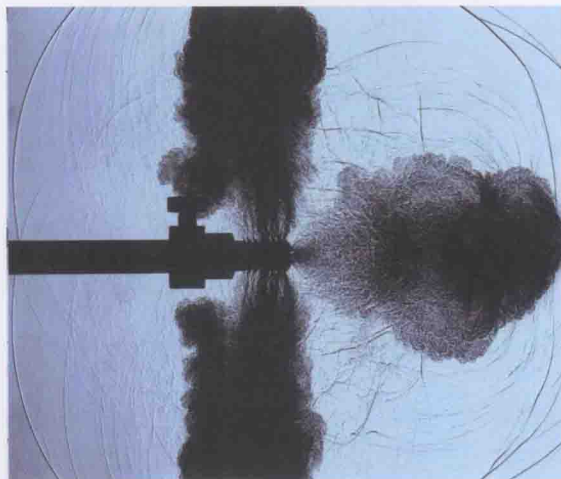


图 0-3 膛口气流形成的大量脉冲噪声波高速阴影照片 (YA-1 拍摄)



图 0-4 火炮发射时的膛口焰

各种形式的膛口冲击波和脉冲噪声波都属于压力波,由于复杂的相互作用,在阵地测量时交混在一起,难于准确地区分;对人员器官的危害机理也难于判断。因此,在危害研究和安全标准制定时,常用压力波的提法。

此外,发射时在口部还发生高频电磁辐射和由气流产生的膛口烟等负效应(图 0-5)。



图 0-5 大口径地面火炮发射时的膛口烟

从弹丸飞出膛口到脱离火药燃气和各种干扰开始自由飞行为止的一段时期，称为中间弹道的弹丸后效期。在弹丸后效期内，弹丸在穿越火药燃气流场过程中，受到火药燃气射流的推力作用，继续加速，在穿过射流的马赫盘后，弹丸达到最大速度——弹丸初速。同时，弹丸也受到各种干扰，特别是尾翼稳定脱壳穿甲弹弹托分离过程，易产生不对称脱壳干扰力，是增大脱壳弹散布的主要扰动源（图 0-6）。

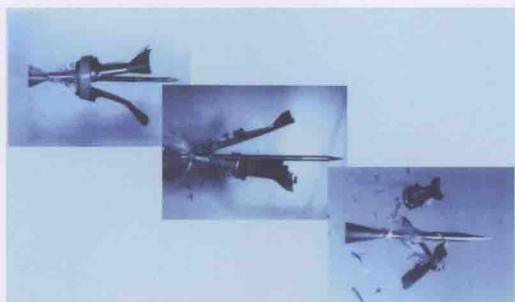


图 0-6 尾翼稳定脱壳穿甲弹弹托分离过程高速摄影

火药燃气自膛口流出开始至排空（接近外界空气压力）为止的整个时期，称为火药燃气后效期。在此期间，火药燃气继续对炮身产生反作用力，是炮膛合力的组成部分，增加了火炮后坐力。

当安装膛口装置时，膛口附近形成多股射流与冲击波相互作用的复杂流场。一方面，改变了炮膛合力的方向与大小；另一方面，改变了膛口冲击波的结构与分布，对火炮受力、冲击波场分布及膛口焰的形成都有很大的影响。

中间弹道学的研究对象是带有膛口装置及运动弹丸的膛口流场。其特点是：火药燃气在膛口外的多层冲击波内继续发生化学反应、燃烧，乃至爆燃转爆轰。由于作用时间短暂（ $0.1 \sim 8 \text{ ms}$ ），参数变化剧烈（压力约从 100 MPa 变化为 0.1 MPa ，温度约从

2 000 K 变化为 300 K, 速度约从 2 000 m/s 变化至 1 m/s), 加之三维气室结构与弹丸、飞散物的高速穿行, 强光与烟雾干扰, 以及各种冲击波、声波的相互作用, 使流场观测和计算十分困难。膛口流场问题是三维、两相、带湍流与燃烧化学反应及强、弱运动间断的非定常流体力学问题, 因此, 中间弹道学是典型的气体动力学、声学、燃烧与化学动力学、爆炸力学的交叉学科。

三、中间弹道学发展的历史回顾

中间弹道学早期属于内弹道学科, 其研究内容仅为火药燃气对枪、炮的后效作用。1886 年, 法国科学家雨贡纽首先计算了火药燃气从膛内排空的规律与对炮身产生的反作用力。第一次世界大战期间, 膛口制退器已开始应用, 法国拉蒂尤提出了设计方法。第二次世界大战前后, 膛口制退器在德国、苏联等国广泛采用, 对后效期炮膛受力与膛口制退器理论的研究开始引起重视。

1. 中间弹道学的起步

1945 年, 苏联学者斯鲁霍斯基首次提出了“中间弹道学”这一术语, 其主要内容是关于火药燃气后效期计算与膛口制退器设计方法。膛口制退器这种利用火药燃气剩余能量减小后坐力的技术以及自动武器利用后效期火药燃气提高射频的技术对兵器的发展和膛口气体动力学的研究起了很大的推动作用。1960 年后, 随着对武器威力和射击精度要求不断提高, 以及应用膛口装置以后, 膛口气流的有效利用及有害现象抑制等问题的出现, 对膛口气流的研究日益受到重视, 中间弹道学逐渐从内弹道学中分化出来, 形成了独立的学科分支。1964 年, 德国学者 K·奥斯瓦提斯正式将自己的著作命名为《中间弹道学》, 标志着中间弹道学的起步时期开始。

2. 中间弹道学的发展

20 世纪 60 年代后期至 20 世纪 80 年代末, 随着高膛压、高初速反坦克炮以及装有炮口制退器的轻型压制火炮的发展, 使得膛口气流危害问题日益严重, 成为影响火炮发展的技术关键之一。一方面, 需要利用火药燃气剩余能量, 增大膛口制退器效率, 以有效地减小后坐力, 提高武器机动性; 另一方面, 又必须抑制由此产生的各种危害效应。这一矛盾在技术上长期未能很好解决。于是, 从弄清膛口气流机理入手, 开展大量的实验与理论研究, 建立了相应的物理模型与方法。这些研究结果构成了中间弹道学的理论基础。

从武器运用与人员、装备的安全保障出发, 对膛口冲击波的形成与分布规律开展了深入的研究, 形成了膛口冲击波动力学方向。声学, 主要是气流噪声学的理论与方法引入, 促进了人员的损伤机理、防护标准和各种防护手段的研究, 推动了创伤弹道学的发展。

20 世纪 70 年代初, 高初速反坦克炮出现后, 为提高脱壳穿甲弹的首发命中率, 开展了对弹丸发射扰动的研究, 逐步形成了以提高弹丸射击精度为中心的发射动力学

分支。

膛口焰现象自 19 世纪末被发现,直到第一、二次世界大战期间,其危害才引起军方重视,并采取了一些消焰措施。20 世纪 70 年代,随着大口径、高膛压火炮的装备,膛口二次焰现象愈发严重,化学动力学方法开始引入中间弹道学中,使膛口焰机理研究步入理论轨道,形成了膛口焰燃烧动力学方向。

膛口装置,包括制退器、助退器、消焰器、偏流器、稳定器、消声器等,作为火炮(枪)的主要部件,一直是研究设计和使用的热点。为推动膛口装置设计理论的提高,作为武器的弹道学基础,形成了膛口装置气体动力学方向。

在这段时期,各国研究机构和大学(以美国陆军弹道研究所(the U. S. Army's Ballistic Research Laboratory, BRL)、德国恩斯特-马赫研究所(Ernst-Mach-Institut, EMI)、法-德研究所(French-German Research Institute of Saint-Louis, ISL)、中国弹道研究所等为代表)开展了连续、系统的研究工作,为该学科的建立和体系的完善起到了奠基的作用。中间弹道学作为新学科,也首次写入《中国大百科全书》《中国军事百科全书》及《兵器科学技术词典》中。中间弹道学(发射动力学)作为弹道学的主要分支,也是历届“国际弹道会议”的交流主题之一。至 20 世纪 80 年代末期,中间弹道学已经形成了一个相对完整的独立的学科体系,与内弹道、外弹道、火炮、枪械、弹药等学科关系密切。在武器系统总体论证、利用火药燃气能量、改进装药设计、解决威力与机动性矛盾、提高火炮(枪)射击精度以及减小气流危害等方面,发挥了重要作用,标志着经典中间弹道学的基本完善。所谓经典中间弹道学,主要是以大量的试验观测为基础,对流场现象的机理和参数变化规律进行细致的描述,以此为基础,建立简化的物理-数学模型和近似的、解析的或半经验公式与相应设计方法。经典中间弹道学理论方法对武器工程设计起到了一定的指导作用。

3. 中间弹道学的未来

新军事革命以来,武器研制、生产、使用水平明显提高,对以精确理论为基础进行精细设计、减少试验环节的需求更为迫切。在此背景下,现有的经典理论已不能满足武器技术发展的要求。因此,进入 20 世纪 90 年代以来,中间弹道学的研究处于低潮。而在此期间,计算机技术(存储量与运算速度)的快速进步、计算流体力学的高精度与并行算法的进展,推动了近代力学的新生,也为中间弹道学未来发展提供了物质基础。中间弹道学需要建立的包括湍流燃烧与化学反应动力学在内的真实、三维、多相、非定常流场的物理数学模型,必须运用高性能、大容量、高效的并行计算机才能解决。例如,完成带复杂膛口流场波系结构的精细描述;复杂膛口装置及运动体的动力学分析;膛口流场燃气两相流的随机点火、湍流燃烧、爆燃转爆轰与二次膛口冲击波形成;高空及水下发射环境以及膛口冲击波的远场传播、地面及障碍物反射、绕射等的全流场中间弹道过程计算;膛口、无后坐炮尾、火箭发射管的燃气射流脉冲噪声形成机理、传播特性与防护措施;模拟复杂运动边界弹丸(如脱壳弹)与气流相互作用过程的流固耦合问题;采用计算流体

力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 和计算气动声学 (Computational Aeroacoustics, CAA) 耦合算法研究膛口噪声场; 在三维真实膛口流场计算软件编制的基础上, 计算膛口装置气流参数、受力、效率以及冲击波场分布, 建立优化设计方法及膛口装置优化设计理论, 形成以精确理论和数值方法为主的理论体系, 为武器精确设计和生产、使用提供技术支持, 为现代中间弹道学的建立奠定基础。

第二节 中间弹道学的研究内容与研究方法

一、中间弹道学的研究内容

- ① 膛口流场特性与物理模型;
- ② 火药燃气后效期理论;
- ③ 膛口装置气体动力学;
- ④ 膛口冲击波动力学;
- ⑤ 膛口气流脉冲噪声;
- ⑥ 膛口焰燃烧动力学;
- ⑦ 弹丸后效作用;
- ⑧ 膛口流场数值计算;
- ⑨ 膛口制退器优化设计方法;
- ⑩ 膛口气流危害控制原理;
- ⑪ 中间弹道学实验研究。

二、中间弹道学的研究方法

中间弹道学是武器设计和使用的理论基础, 是一门应用基础学科。由于其现象的复杂性和特殊性, 既要进行必要的现象机理分析和基本原理的研究, 又直接受武器研究设计与试验的检验。因此, 它是应用基础与应用技术交叉的学科。其研究方法具有近代力学研究的特点——实验、数值计算、理论三者紧密结合、相辅相成、融为一体。

1. 实验研究

实验是认识科学规律和检验成果的基本手段, 对中间弹道复杂物理现象的研究尤其如此。中间弹道学实验研究以弹道靶道和靶场为主要试验平台, 由各类专门测量仪器设备组成中间弹道测量系统。包括靶场全尺寸试验与实验室模型试验两种。模型试验以相似理论为基础, 主要任务是观测和发现新的物理现象, 分析机理, 测量流场参数分布规律, 提供定性的全流场可视化的时间演化图像与参数测量的定量结果, 为建立准确的物理—数学模型做准备。全尺寸试验是检测理论和设计的最直接手段。两种试验平台各有所长, 相互比照, 统一安排, 形成完整的中间弹道学实验体系。本书将以大量的、各种

类型的试验数据、照片、资料作为机理分析的基础,尽量做到真实、形象、直观地阐明理论,验证设计及计算方法的准确度。

2. 数值计算

数值计算是以计算机和计算流体力学方法为手段,以求解膛口流场三维、带燃烧化学反应非定常的非线性问题为主要内容,是中间弹道学近代理论的主要研究方法。当20世纪60年代中间弹道学形成独立学科分支时,正值计算流体力学刚刚兴起,进入20世纪90年代以后,数值计算方法已成为近代力学领域的实用手段。

CFD是用离散化的数值计算方法和计算机直接求解流动主控方程(Euler或N-S方程)。当前CFD问题的规模,网格数达到了十亿级,工业应用达千万级,为中间弹道学解决复杂气流与气-固耦合问题创造了良好条件。

CAA是计算流体力学与气动声学的交叉学科,采用数值计算方法研究流动与固体边界间相互作用产生噪声的非定常机理,为膛口脉冲噪声的预测与控制提供了新的手段。

计算流动显示(Computational Flow Imagine, CFI)是应用光学流动显示原理(如干涉、纹影、阴影等),把数值计算得到的密度场转换为各个方向流动显示图像。可以将CFD的计算结果与试验结果直接、形象地对比,验证CFD的有效性。这个方法对提高中间弹道瞬态流场的可视化程度十分有效,本书中部分算例采用。

3. 理论分析

理论分析是将实验现象用已有的物理、化学知识进行机理分析和解释,或者,根据实际问题的性质、设计要求和解的难度,分类抽象为各种典型问题的物理模型,并基于简化数学模型给出分析解或半经验的简化方法,为系统参数分析与结构优化设计提供一种快捷的理论方法。本书将简化理论方法作为辅助手段。

三、本书的基本思路

以二、三维非定常流简化(理想)物理模型为基础,以数值计算与实验、分析相结合的方法为主要手段,以便于读者理解和工程应用为目的,将过去多年机理研究的现象用新的角度加以总结和分析,建立为工程优化设计所需的简化理论方法。

① 实验以介绍物理现象和总结规律为主,为增强可视化,书中附有大量瞬态流场图片,主要实验结果出自本室完成的《膛口流场高速摄影数字式图库》。

② 理论以分析物理-化学现象的发生、发展机理为主,便于读者了解本质。

③ 计算以数值方法为主,理论或解析方法为辅,后者在附录中详细介绍。

④ 尽量减少已过时或烦琐的数学推导以及在现有文献、书籍中已详细介绍过的内容。本书所需的必要知识与概念在附录中介绍。

⑤ 数值模拟采用体系研究方法,以非定常欧拉方程与N-S方程为基础,按问题的性质与应用目的,简化为三类基本问题:

第一类问题为膛口非反应流。这类问题中化学反应的影响较小或者不是研究的主要方面,如膛口早、中期流场流谱可视化与数值模拟,火药燃气后效作用、弹丸的后效作用、膛口装置内流与效率计算以及远场冲击波场的计算等。

第二类问题为膛口反应流。这类问题中化学反应的影响较大或为研究的主要方面,一般与湍流燃烧相关,如膛口焰(烟)、二次燃烧(二次冲击波)等。

第三类问题为膛口气流脉冲噪声。膛口气流脉冲噪声场的计算与流动现象紧密相关,主要研究膛口脉冲噪声的产生、传播与分布特性。