

现代枪炮内弹道学

[美] H. 克里尔 主编
M. 塞墨费尔特
谢 庚 译

596790

国防工业出版社

596799

TJ 012/02

现代枪炮内弹道学

〔美〕 H.克里尔 主编
M.塞墨费尔特
谢 庚 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是从美国《宇航学与航空学之进展》丛书的《Interior Ballistic of Gun》分册译出的。它是美国60年代中到70年代末在内弹道学研究方面(包括理论和实践)的综合性总结。全书共15篇(文章),它介绍了:一般火炮、轻武器、速射炮、无坐力炮等的弹道模型和有关特点,以及高初速炮理论;高夫(Gough)模型的两相流理论,点火系统与装药结构和压力波与火焰传播的关系;用密闭爆发器研究火炮初速随火药性能变动的敏感度,内弹道现代测试技术和实验装置;现用发射药特性及其与内弹道有关问题和以基本分子概念为基础研究火药气体状态方程;以及美国弹道研究所(BRL)的发展史和展望。作为附录,译本最后补充介绍了美国陆军试验和鉴定司令部的武器测压操作规程。

本书对我国从事与内弹道学有关的人员来说是一本既有启发作用又具有实用价值的参考书。

Interior Ballistics of Guns

Herman Krier

Martin Summerfield

Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics

*

现代枪炮内弹道学

H. 克里尔

[美] M. 塞墨费尔特 主编

M. 塞墨费尔特

谢 庚 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 21¹/₄ 477千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数: 0,001—1,180册

统一书号: 15034·2638 定价: 3.25元

编者序

在《宇航学与航空学之进展》丛书中,计划出此新卷是由于我们(本书编者)有鉴于这样一个事实所致,即虽然过去30年中,特别是1970年以来的10年中,枪炮内弹道学这门学科已有显著的进步,然而还没有一本有系统的教科书或专题论文集把这些新近的进展概括起来,既有利于愿进入此领域内的初学者,也有益于欲需研究某些特殊问题的专家们。被最广泛地应用的、包罗这方面的理论知识水平的书籍是以下几位物理化学家的著作:即康纳(J. Corner)教授的《火炮内弹道学》(注1),洪特(F. R. W. Hunt)的《内弹道学》(注2)。这两本书是洪特、康纳和他们的同事们在第二次世界大战期间完成的研究成果。以后,在1965年出现沙吉尔(A. E. Seigel)的局部发行的专著,《高速火炮理论》(注3),但它主要被限制在内弹道学的气体动力原理的范围以内,利用了前二十年中的可压缩气流理论的进展成果。在苏联,谢列伯梁可夫(M. E. Serebryakov)的《身管武器与固体发射药火箭内弹道学》一书〔1942年初版,1949年修订再版,1962年修订三版(注4)〕,完成了教科书的作用,但它的科学深度颇受局限。然而,按现在的发展来看,所有这四本书(注5)已远远落后于今日的知识水平。科学发展的步伐是迅速的。的确,在本书中许多论文所讨论的枪炮性能问题和枪炮病理学(注6)在1970年之前是完全不可能加以定量地讨论的。

康纳和洪特的书是写在现代的高速和大容量电子计算机出现之前,因而在这些书中,处理流体流动与燃烧过程时的理论方法必定包含着严重的近似性。谢列伯梁可夫的书也有同样的不足。沙吉尔写的书主要着眼于内弹道学的纯气体动力学方面,而不注意固体发射药的存在情况。在这本书中将可看到在过去10年内有三个新因素已进入了内弹道理论中,而每一个因素刚巧都是从一连串与内弹道学无关的学科那里涌进来的。第一个,也是最主要的因素,是对固体发射药燃烧的详尽讨论,特别包含燃烧过程开始时的点火与火焰传播阶段以及连带的非定常气体流动现象,而所有这些已经在火箭技术领域内达到了先进的发展水平。第二个因素是列出两相流形式的动态的流体流动方程系,连同两相间相互作用的适宜的关系式。第三个因素是使以上两个因素结合起来成为可能,亦即利用先进的计算机来解那些用以描述带有固体发射药药粒同时燃烧的非定常两相流系

注1: 原文名 The Theory of the Interior Ballistics of guns, 1950年纽约 John Wiley and Sons 公司出版。中译本1958年国防工业出版社出版。

注2: 原文名 Internal Ballistics, 1951年伦敦 His Majesty's Printing Office 出版。

注3: 原文为 Theory of High Speed Guns, 是一本在巴黎的大西洋公约组织(NATO)的航空研究与发展咨询组(AGARD)所出版的局部发行的专著。

注4: 谢列伯梁可夫的俄文原名为 М. Е. Серебряков, 他的书初版和再版都叫做《内弹道学》, 三版修订本才叫《身管武器与固体发射药火箭内弹道学》。二版中译本分上下二册分别于1957, 1958年出版。三版中译本在1965年出版。以上译本均为国防工业出版社出版。

注5: 1958年苏联出版贝切赫钦等人的《内弹道学气体动力原理》, 其科学水平至少不下于谢列伯梁可夫的著作。此书中文译本1960年由国防工业出版社出版。这里未提此书应该说是一遗漏。

注6: 枪炮病理学(pathologies of guns)是现在的新名词, 应包括火炮膛内烧蚀, 膛炸, 火炮寿命等内容。

统的偏微分方程系。弹道理论扩大成这样的两相流理论和燃烧理论的样子已给弹道学者带来新的理解力以及新的预计与分析的能力。

为了反映这种理论上的扩大，把新的内弹道学这门科学的名词加以修订，称之为膛内燃烧弹道学，或许是适宜的（注7）。从历史上看，这类型的首创著作是普林斯登大学（Princeton U.）的郭（Kuo），维希奈夫斯基（Vichnevetsky）和塞墨尔费尔特（Summerfield）三人的论文，题目是“在封闭条件下有孔隙的发射药装药中火焰锋面传播理论”，它最初作为郭的博士论文发表，然后登载在美国航空与宇航杂志（AIAA）1973年四月号上，文章证明了斯夸（W. Squire）与戴文（M. P. Devine）在法兰克福特兵工厂（Frankford Arsenal）测出的堆积的发射药床中的压力波分布图是可能准确地推导出来的。这个理论的惊人成就，包含对燃烧波中“大陆分水岭”（注8）的预计，开创了一门新学科：膛内燃烧弹道学。

在我们看来，将来在内弹道学理论中有待出现的最大变化可能是在改善对燃烧过程的列式方面。尽管现在这方面有详尽叙述，但当今在内弹道学中所应用的对燃烧的描述由于缺乏在火炮气流条件下发射药的烧蚀性燃烧知识和缺乏动态燃烧速率的知识而受到限制。我们甚至不知道生成物气体是否的确是全部燃烧了的，因而在流体流动区域内实质上是惰性的（注9），如在所有流行理论中所假设的那样，或者是仍在起反应因而而非惰性的。有一些证据说明以硝化棉为基的固体发射药的气体火焰呈现出一种相对地缓慢的化学反应（它的特性迄今尚未被确定下来），并且说明“二次燃烧”（注10）在药室中和沿身管而下可能是重要的。所以，膛内燃烧弹道学这门学科离完善尚远。除此之外，在我们面前还有一些牵涉到复杂的流体流动过程的十分艰巨的问题；例如，火焰传播与流动过程的多维性，湍流的掺入，以及把所有这一切变换成可运用的有效的计算机编码等，都是仍须去完成的目标。

然而，本书汇集了这新领域中的如此之多的内容，这使编者感到尽管对内弹道学的积极研究还正在进行之中，现在把它们发表出来是正确的。在计划出本书时，我们经过考虑后断定，这些新的研究方法，除非伴随有以最新术语来叙述以前通用的诸分析方法中的最优者的文章，以及关于发射药特性，燃烧的热化学，膛内流体动力学，内弹道学研究中的实验方法，和内弹道学方法应用于典型的现代火炮上等的补充文章，是不会被充分理解的。这样一来，本书成为一本较综合性的书，并获得了适合于高等教育目的的现代内弹道学教科书的资格。由于本书确实实地引用了超过千篇的参考文献，也给内弹道学界以独特贡献，有益于做实际发展的工程师们和做研究工作的科学家们。

由于决心把本书编成教科书式样，把这样几篇文章：即从物理学和流体力学的原理来发展内弹道学，然后把所得的简化了的分析结果应用到实用火炮工程上的那类文章，放在本书的起始就变得合乎逻辑的了。这样，这个类型的第一篇文章，系克里尔（Krier）和亚当斯（Adams）所写，作为《现代枪炮内弹道学》的引论，并且还介绍了一种简单

注7：膛内燃烧弹道学（interior combustion ballistics）是本书所采用的新名词。我们也不妨叫它为现代内弹道学，而把它以前的内弹道学称为经典内弹道学。

注8：原文为 Continental divide，形象地描述压力波分布情况。

注9：惰性意即不起化学作用。

注10：二次燃烧原文为 after-burning，或译后燃。这里说明生成物气体尚有化学反应。

的弹道模型是怎样地能够被发展起来的基本原理。用它预计出来的一门大口径火炮的膛压与弹丸速度曲线同用其他模型得到的和实验测定的曲线进行了比较。拜厄尔(Baer)的论文介绍了内弹道模型的技术发展水平,注意到这些模型在准确预计弹道性能方面是好到何种程度的。拜厄尔收罗的参考文献是70篇单独的弹道学研究论文。哥尔德斯太因(Goldstein)也论述了弹道模型的应用,但注意力在轻兵器系统上。在第四篇论文中,韩耐(Heiney)详细叙述一种工程内弹道模型,包括高发射率火炮(注11)的诸因素。计及弹后气体速度梯度和传热损失的新方法也被介绍了。这类文章的最后一篇是舍尔明斯(Celmins)的,研究了无座力炮内弹道模型。它提供了通过身管与炮尾部的超声速喷管的非定常流气体动力学的详尽分析。

在下一类的四篇文章中,读者将被引进到细致的内弹道学的较先进的领域中。它们中的第一篇为沙吉尔(Seigel)所写,评述了火炮中一维可压缩流动的理论,并推导出弹丸炮口速度的单值极限。它提出获得超高炮口速度的新方法,并对得到这样高性能的火炮提出了研究范围。在这篇文章中,引证了上百篇的参考文献。第二篇论文是高夫(Gough)的,是一篇叙述以前提到过的新领域的文章,此新领域我们已把它起名为膛内燃烧弹道学。带有固体发射药的点火与燃烧的两相非定常可压缩流的方程系被应用在模拟火炮起动阶段的问题上。起动阶段有时被火炮工程师叫做点火阶段,虽然从燃烧学的角度看,点火指一特定现象即火焰的起始,而没有更多意义。高夫模型的结果包含着有时被称为底火-发射药分界面的影响和装药结构的效应。文章强调了流体力学守恒方程系的结构,连同所需要的本构关系式,并讨论解的数值方法。对论述此问题的其他先进的两相流列式方法本文给出了参考文献。

在下一篇这类文章中,梅(May)与霍斯特(Horst)按照内弹道学的理论模型论述在点火与火焰-传播阶段内,火炮装药中的压力波的实验证据。他们的工作已证明这种压力波不仅修改了最后的弹丸炮口速度值,因而偏离了理论的性能预计值,而且甚至会引起炮尾部膛炸,弹头过早爆炸或对火炮药室的其他破坏。这类文章的最后一篇是依斯特(East)的,为了得到火炮装药的点火方面的知识,特别注意其中的火焰传播与起始流动过程,他论述了这方面的实验研究成果。他得出结论说:一个点火体系在某个火炮发射系统中作用得令人满意,而在明显相同的火炮系统中却也许会作用失灵,这是由于打乱了一些参量的临界平衡所造成的,而这些参量控制着装药反应作用和弹丸运动之间的关系。

紧接着所提出的二篇论文是讨论在制造枪炮用发射药时的质量保证和质量控制问题的。虽然看来利用产品的严格的物理化学分析来控制发射药生产过程似乎更直接了些,但结果证明较好的是以实用的燃烧试验来测试产品,这样的测量更接近于发射药所应有的性能。在这里,内弹道学理论起了指导作用。

在第一篇论文中,本劳温(Ben Reuven)与塞墨尔费尔特(Summerfield)证明:由一特定发射药所产生的炮口速度在理论上可以根据一组可被测量的因素所决定而不用在火炮中试射发射药。这套方法是通过一组能够被测定的敏感系数加以描述的,其中最

注11:高发射率火炮(high-rate-of-fire guns)与速射火炮(rapid-fire guns)为同义语。发射率指每分钟发射的弹丸数目。

重要的测试因数为相对压力与相对陡度(注12),均可以方便地在密闭爆发器试验中被测出(注13)。舍里奥(Serao)与皮尔斯(Pierce)在他们的论文中总结出一套有系统的实验程序,把特别准备好的有偏差的发射药样品用密闭爆发器试验来估计出火炮炮口速度相对于发射药性质变化的敏感度。他们的工作目的是企图对火药新产品寻求另一条可靠的技术途径来预计弹道性能以代替实际的靶场射击试验。这两篇文章结合起来就提供了一个为求得质量保证的定量上的(在理论上合理的)框架。

内弹道学中的理论工作必须要由具诊断性的内弹道测量技术来支持。测定炮口速度和测定药室与身管中的压强在今天已相对地容易了,但还需要更详细的知识以便测定各种内弹道模型。由于有高压、高温、迅速的变化率,和强烈的激波与振动等的这些严峻条件,使这项工作格外困难。费希尔(Fisher)的文章不但描述了一些标准测试技术,而且也描述了在现代内弹道学研究中用到的一些重要的研究性测试技术。这篇文章的重要部分是讨论用于火炮中的发射药点火,燃烧,和弹丸行程的实验研究的测试设备。

发射药特性的研究课题在任何内弹道学的论述中都是一个基本要素。司梯费尔(Stiefel)利用上百篇的参考文献,论述了枪炮发射药,包括它们的历史,术语,生产过程,热化学,燃烧速率和物理性质等一些为内弹道学者所关心的内容。然而读者必须注意:表征发射药特性的领域不是固定不变的。新发射药经常是为某一专门目的而发明的,但是不仅如此,对究竟什么样一类特性对现代内弹道学来说是重要的这种理解随着理论不断发展来看正越发深入了。司梯费尔的论述是既作为直接有用知识的一种来源,也作为考虑何种特性要被评定的一个出发点而被提供出来的。

在研究发射药的同时,有必要进行准确的内弹道理论工作来表明燃烧气体的特性。鲍威尔(Powell),韦尔蒙特(Wilmot),哈尔(Haar),和克拉因(Klein)的论文讨论对高压,高温气体的非理想的状态方程,把气体和它们的分子性质连系起来。这是一项庞大的题目,它不但对枪炮弹道学家有其重要性,而且更广泛地对纯物理学家与物理化学家,和对许多领域中的应用科学家也有其重要性。鲍威尔等人促使这个具有它所有的复杂情况的题目达到了应用于内弹道学的水平。

至此,读者可能会感到满足,认为上述一系列文章构成了充分的整体概念。当然,还有许多为内弹道学者所关心的其他问题范围——身管加热,身管烧蚀,炮口焰抑制,以及许多其他等等——但是主要问题可以看作都涉及到了。然而,我们编者判断这总题目还有一个重要方面被遗漏了,即它的历史发展。如果不考查内弹道学演进的某些细节,不但在其理论方面,而且也在实际与经验方面,从而在其中发现许多极重要的进展的话,要想把内弹道学作为一门应用科学来理解它的全貌,实际上是不可能的。

为此目的,编者邀请马里兰州阿伯丁靶场的美国陆军弹道研究所(注14)的瓦特迈逸尔(Watermeier)与霍尔班(Hurban)来写这类论著。他们的文章是本书的最后一篇,作者利用他们在此领域中长期的专业经验,选出弹道研究所(BRL)的内弹道学研

注12: 相对压力(relative force)与相对陡度(relative quickness)的定义见这篇论文中。

注13: 原文为 Closed Combuster, 应译作密闭燃烧器。但它和 Closed bomb 为同一测量仪器。后者已习惯地译成密闭爆发器,故前者亦译成密闭爆发器。

注14: 原文为 U. S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Md. 简称 BRL。在本书中简译为弹道研究所或直接用 BRL。

究与发展的光辉部分加以历史性的评述。文章从第一次世界大战回顾起从头到尾一直综述到现在为止。也许人们会希望有这样一篇评论把美国其他内弹道实验室中，如在海军的，在空军的，和在私人企业的有关实验室中，以及外国的实验室中的全部重要研究工作都包括进去，不过立刻会感到这是不可能的。这需要单独一整本书来做这项工作。然而事实上，BRL的科学史是和二十世纪中的内弹道学的科学通史紧密地并驾齐驱的。从它的成立以来，BRL一直在提出内弹道学中的最重要问题，并且继续在做。于是，这一章虽然致力于狭小的范围，也可认为达到了我们的目的。然而，为了使读者有较广阔的门路到此领域去，瓦特迈逸尔与霍尔班在文章后面已附录了重要读物一览表来介绍其它的研究与发展的组织中的工作。加上文章中超过 150 篇的参考文献在一起，那末这个领域的范围和它的历史发展已被描绘得特别详细了。

编者提供这本有关内弹道学进展的书怀有这样的信念：它将作为一本有用的教科书，给学生和其他人员介绍一门具有古老渊源的有意义的科学的现代面貌。我们也相信它能够对从事此领域的人当他愿意在某些特殊课题上进行创新研究时作为一本有用的参考书。编者对美国航空与宇航学会(AIAA)的科学出版社的管理人员布鲁安斯 (Ruth F. Bryans) 的熟练的专业工作——并且对她和我们在一起的耐心——和她的助手，丛书的事务编辑，贝利南 (Norma J. Brennan) 的工作，表示由衷的感谢。最后，我们对作者——我们如此广泛地吸收他们的专长——怀着巨大的感激之情，他们对这项事业付出了许多时间和精力，以及他们乐意和我们合作贯彻在整个工作中。我们希望他们将终究会得到应有的报答，即在未来的年月本书的许多使用者会对他们抱有谢忱的。

编者：海尔曼·克里尔

马丁·塞墨费尔特

1979年4月

译 者 序

这本《枪炮内弹道学》(Interior Ballistics of Guns)是美国1979年出版的,属于《宇航学与航空学之进展》丛书中较新的一册,内中包括十五篇文章,各篇系特邀不同作者按专题分别写成的,并由编者编纂成书。编书的目的和各篇内容已由编者克里尔(H. Krier)与塞墨费尔特(M. Summerfield)在编者序中详细介绍。把《内弹道学》列为《宇航学与航空学之进展》丛书之一是耐人寻味的,它打破了五十年代甚嚣尘上的常规与尖端的划分界限。今天枪炮仍是非制导的近程(比之洲际导弹之类而言)抛射武器,这在本质上未变,因此枪炮内弹道学还是属于常规武器的范畴内;在常规武器中,和枪炮并列的还有火药火箭,它和导弹的区别仅在于它没有制导系统,因此把它随着导弹列为航空与宇航中的学科,当然言之有理;然而本书不谈火药火箭,主要谈的是枪炮,居然也列为《宇航学与航空学之进展》丛书之一,那就见仁见智,看法各有不同了。但这里至少反映出一种观点:即火箭发动机与枪炮燃烧室之间在某些课题方面的研究是有接近之处,因而从学科角度来看,有人愿把内弹道学列入这类丛书之中,而不避高攀嫌疑,也就不足为怪了。

本书编者在编者序中指出,七十年代前后是内弹道学进展最快的十年。我在1964年翻译苏联谢列伯梁可夫的《身管武器和火药火箭内弹道学》一书中写译者序时曾提到:该书介绍的是经典内弹道学,但现代内弹道学已在冲击着经典内弹道学。不过那时自己对现代内弹道学的具体范畴也不是十分清楚的。去年(1980)读到本书,感到面目一新,现代内弹道学的雏形恍如突然出现一般,这十多年来内弹道学发展的迅速,的确也出乎意料。本书编者把本书也称为《膛内燃烧弹道学》(Interior Combustion Ballistics)以示有别于《经典内弹道学》,而我们现在对本书采用《现代枪炮内弹道学》的名称,认为用它可标识这三十多年(特别是近十多年)来内弹道学的进展,也感到和经典内弹道学对比起来用此名称更为醒目些。

值得提醒的是,现代内弹道学是在经典内弹道学的基础上发展起来的,但在目前实际应用中既不能也没有必要替代经典内弹道学;因为内弹道学是一门工程技术学科,它的实践性是检查其存在价值的标准,就目前大量常用的常规武器的初速的范围来说,经典内弹道学利用一些必要的符合系数方法,基本上可以解决问题。这就说明如何改善经典内弹道学的应用,例如利用现代电子计算技术和先进的测试工作来进一步做符合系数工作以达到较高准确度和更为简便的要求,以及其他一些实际问题等等,其中还有大量工作可做。另一方面,常规武器的性能在不断提高,例如有的反坦克炮初速已高达1800米/秒(有些高速炮,初速已达每秒几千米,甚至每秒万米以上,不过这些均是实验室范围内的弹道炮,供研究之用)。它们的某些膛内现象已非经典内弹道学所能解释,如再用经典内弹道学的符合系数方法来解决这类武器问题,既缺乏实践基础,也往往把物理本质掩盖,会导致荒谬的结论,更不用说对这类武器今后发展能作出有力的指导性作用。对这类武器的膛内现象,必须从发射药的点火、燃烧、气体与颗粒的流动,压力波的产生

等一系列相互影响的现象加以全盘考虑不可，那就不是人们惯用的经典内弹道学所能办到的；为了研究这一系列现象，膛内燃烧弹道学（我们称之为现代枪炮内弹道学）便应运而生，所以现代内弹道学是根据客观需要而产生的，不是纸上谈兵而是有其实践意义的。尽管它在实际应用中还有许多地方不成熟，但对它的研究价值应该肯定下来。这就是近十多年来国外内弹道学界对它大力开展研究的原因所在。

如果进一步要向现代内弹道学的特征以及和经典内弹道学的关系，我认为不妨从以下四个方面来考虑。

其一，从理论基础来讲。经典内弹道学的理论基础是热力学；关于膛内气体流动现象，经典内弹道学一直是遵循一百八十多年以来的拉格朗日假设（即假设膛内气体速度在整个时间内与距离呈线性规律的变化），此假设在此漫长时期即使有所发展，但总的思路未变。在第二次世界大战期间和以后，有些内弹道学家深入研究此假设，进而放弃此假设而把气体动力学引入内弹道学的领域中；其中值得一提的是在欧美内弹道学界中享有很高声誉的康纳（Corner），在他的《内弹道学》（1950年）一书中有一章名为内弹道的流体动力学问题是第一次把流体动力学引入内弹道学中的尝试的文献；而这方面更为深入的公开文献，就我所知，要算苏联科学院院士斯坦纽可维奇（Станюкович）主编的《内弹道学的气体动力原理》（1957年）一书了。如果说在内弹道学中引入气体动力学是现代内弹道学的一个特点，那就是说现代内弹道学的理论基础除了热力学外，还应有气体动力学。

其二，从数学模型和计算技术来讲。经典内弹道学要解的是诸常微分方程和必要的代数方程的联立方程系。直到第二次世界大战，长期以来解此方程系和建立内弹道表是经典内弹道学的重要内容。方程系在简化的闭式积分下或在较普遍的数值积分上用手工发展到机械式计算器完成计算，当然现在更可以编制各种程序用电子计算机解决。对比之下，现代内弹道学因为考虑气体流动特别包括两相流问题在内，因而把物理模型复杂化，当然数学模型也就复杂化。这种数学模型必然包含偏微分方程系。这就带来解题上一系列困难；如果没有电子计算机便寸步难行。也正因为近年来各类电子计算机的大量应用，因而各种各样的内弹道数学模型相继出现。这说明没有电子计算机的发展，也就不会有现代内弹道学。难怪在本书中有的作者声称：现代内弹道学是电子计算机时代的内弹道学。

其三，从物理模型来讲。上面已提到数学模型是建立在物理模型之上的。在经典内弹道学中，既为了得到简化的数学模型以便易于求解，有时也由于我们对现象本质理解不够，就必须提出许多必要的假设，假设的多寡也就确定了物理模型的简繁程度。一般地说，假设往往不能较确地反映内弹道过程的物理实质。举例来说，在经典内弹道学中有二条重要假设：一条是全部发射药粒被瞬时点燃，这就把点火问题掩盖起来了，然而它显然是程度不同地不符合实际情况的，特别是高初速武器的反常情况往往发生在点火阶段；正因为如此，现代内弹道学放弃了此假设，把点火问题作为它的一个重要课题。另一条是经典内弹道学不但采用拉格朗日假设还进一步假设未燃完的药粒运动是和气体运动同步的，这显然也和事实不符，特别在装药量超过弹重时问题更大，于是现代内弹道学也放弃这些假设，产生了两相流理论（两相流理论本身有许多假设，但应该说它们比经典内弹道学的假设要和事实接近一步）。从目前的情况来看，可以这样说：点火问题和

两相流理论是构成现代内弹道学物理模型的两根支柱。至于发射药在膛内燃烧的规律性，无论经典的或现代内弹道学中，基本上还是用实验的燃烧速度公式和假设的几何燃烧定律，这说明把现代有关的燃烧理论应用于内弹道学中还有很大距离，更由于内弹道学是一门工程技术学科，引入太复杂的理论的可能性和必要性，均有待今后的发展而定。但现代燃烧理论的进展肯定会有助于对膛内现象的深入了解的。

其四，从测试技术来讲，内弹道学理论模型的建立既然包括许多假设，就必须有仪器设备进行测试，既可校验理论计算结果，也可为开辟新理论探索途径。经典内弹道学之能够成为一门学科，就是由于压强和初速的测量技术已达到一定程度的准确性和再现性，否则是不可能的。同样道理，现代内弹道学的建立和今后的发展也是由于实验弹道学的进展结果。今天不但对膛内的压强-时间曲线和速度-时间曲线能测试到一定精确度，像测弹底压强，膛壁温度，药粒运动情况，高速炮实验装置等较新测试技术，也都是陆续在这二十多年中出现的。膛内现象的特点是高温、高压、瞬变，应该承认它的测试工作的难度，但内弹道学的研究要卓有成果，最终须决定于弹道实验的进展程度。美国陆军弹道研究所的原文全名应译为弹道研究实验所(Ballistic Research Laboratory)，可见其着重点也在实验测试上。

综述以上四个方面，可以大致看到现代内弹道学和经典内弹道学的关系，它的发展的必然性和特点。这些现代内弹道学的特点在本书中都有所反映。为了帮助读者对全书有全面的了解，除了请阅读编者序外，现在进一步把本书的特点和重点补充说明如下：(1) 点火问题连同压力波现象是本书讨论的重点，不但散见在各篇中，还在第八篇和第九篇中比较集中地讨论它；(2) 两相流问题在有关篇章中有所提到，而在第七篇中专门讨论此问题，迄今为止范围只局限于一维的；(3) 关于利用电子计算机的内弹道模型的介绍也散见于有关篇章中，例如第二篇专论火炮内弹道模型，第三篇专论轻兵器内弹道模型；(4) 关于内弹道实验方面，第十一篇介绍了分析火药与弹道性能之间关系的实验计划，估算弹道性能方法和评价；第十二篇介绍现用的简单和复杂的内弹道测试仪器和设备；第十篇介绍在实验内弹道学的范畴之内的两个新名词：即相对陡度与相对压力，其目的是设法用密闭爆发器测试来代替部分靶场测试，在保证一定准确性下以节省人力物力；(5) 本书所讨论的膛内现象主要是火炮，包括大炮、榴弹炮等，但对轻兵器（第三篇），速射炮——主要讨论飞机载用的机关炮，口径从10到30毫米，差不多介乎轻兵器和火炮之间（第四篇）；无坐力炮（第五篇）则分别另辟专篇讨论。第六篇专门讨论高炮口速度火炮，其初速在10000~40000英尺/秒之间，属于各种实验弹道炮的范围，供研究之用；(6) 本书对某些重要的内弹道学现象加以分析研究，而它们在经典内弹道学中往往被忽略或简化。除了最重要的现象如点火与压力波，两相流之外，书中还不同程度地讨论了炮口焰问题（第四篇），钝感剂问题（第三篇），噪声问题（第五篇），坡膛问题（第六篇），散热问题（第四篇）等。这些问题有的虽是开始，但对今后研究提供了有力线索。又如对液体炮和炮管寿命之类的问题，本书尚未深入介绍。还顺便提一下：第一篇、第十三篇和第十五篇属于引论、通论和历史介绍等性质，但并不因此失去它们的重要性，这些在编者序中已有详细说明。第十四篇在理论上有其特殊性，它研究状态方程是建立在基本分子概念上的，这给内弹道学中某些问题作微观分析开辟了途径；(7) 本书还有一个特色，即各篇参考文献之多是超过一般的。可以这样说，在1978年之前的主要的

欧美内弹道学文献都被列入了（当然以美国为主），这为内弹道学的科研工作者提供了极大方便。稍感不足的是甚少收罗苏联的内弹道学文献。

本书编者在“编者序”中提到他们编纂此书的目的之一是因为近三十年来，特别是最近十年，内弹道学的显著进展还没有一本书来较完整地加以介绍，所以才编本书来填补此空白；编者的这个目的应该说是达到了。他们又提到编此书的另一个目的是把此书当作现代内弹道学教科书，如果从这个目的来看，我们不妨大胆地指出它的不足之处。首先，由于它所包含的十五篇文章是由不同作者被特邀撰写的，因此各篇所用名词定义有时不统一，文字风格有时显得不谐调；尤其是前者会给读者带来困惑。举例来说，“火药力”一词是内弹道学的专用名词，姑不论此译名是否恰当，但沿用至今已成习惯不便更改。问题是在本书中火药力的原文有多种多样，例如有 Force Constant（第一篇）、Force（第二篇）、Specific force Constant（第一篇）、Impetus（第四、五篇），显然很混乱，现在译本中都统一译成火药力。又如新名词 Relative Quickness 在第一篇中被定义为燃烧速率的比值，而在第十篇中又被定义为 dp/dt 的比值，我们不得已把前者译为相对捷度，后者译为相对陡度；看来 Relative Quickness (RQ) 一词的意义应以后者为主。同一名词但含意不同以及许多词代表同一意义的现象，都说明美国国内所用名词不统一，但反映在同一本书中，就更使读者为难。其次，由于十五篇文章独立成篇，各篇之间没有多少连系，因此系统性较差。各篇所用符号有重复叙述和不同意义之处。采用的图形也有完全重复印出的，如第九篇的图 8 和第十二篇的图 15 完全相同，第三篇的图 6 和第十二篇的图 17 完全相同。第三，本书有不少印刷错误以及某些文字和内容值得商榷的地方，译者不揣冒昧，有的加以修改，有的提出商讨或解释，都用注解的形式注明，以示负责（在译本中有二种注解符号，凡带 * 号者系原书所具有而译出的。其他所有注解，均为译者所加的，如有错误应由译者负责。顺便提一下，译文中较多地保持了原文中的被动句形式，这虽然不大符合汉文的习惯，但译者认为这还是有其优越之处的）。

应该特别强调的是：本书是由美国内弹道学界专家所写文章的汇编，内容相当新颖，译者是怀着学习的心情来进行翻译的，由于水平和客观条件的限制，译文无论在文字方面还是在内容方面，错误在所难免，尤其是首次接触的东西，所列注解许多是因为译者了解不够，作为存疑而提出来的，即使对原文有所说明或商讨，也不一定正确，这些均希望读者指正。这篇译者序包括一些译者不成熟的看法，不妥之处也请同行批评指教。希望本译本的出版，对我国兵工界有所裨益，它可作为研究人员，工程技术人员和其他有关人员的一本有价值的参考书。

在这本译本后面附有一篇“美国陆军试验和鉴定司令部试验操作规程 (TOP-3-2-810)：武器压强测量部分”是原书所没有的。增添这附录出于这样理由：自从经典内弹道学问世以来，铜柱测压器即成为弹道测试的主要内容之一，待 40 年代以后压力传感器才逐渐开始应用。近年来由于欲测压强值提高，铜球测压器在测高压时代替了铜柱测压器，但其作用原理未变。铜球测压器和压力传感器在现代内弹道学中仍是测试的主要手段之一。这份操作规程是 1979 年 10 月 5 日由美国陆军部颁布的，和本书出版日期差不多同时。这说明经典内弹道学和现代内弹道学之间的连续性，在有些方面很难截然分开，而且后者不能也不必代替前者。这篇附录便是很好证明。由于测压在内弹道学中的重要性，这篇附录可以使我们了解美国在这方面测试的严格的操作规程，可提供我国的靶场和研

究所作为很好的借鉴，因此附录此篇也可提高本译本的实用性。这篇译文是由侯新帜同志执笔的。

译本还附有索引（1）和（2）。索引（1）包括人名、地名、机关名称；索引（2）包括缩略语。这些都是原书所无的，增加索引主要为了方便读者。

本书的翻译出版是和祝榆生同志的鼓励，以及太原机械学院领导、202研究所五室同志的支持分不开的。关于发射药方面的化学译名，曾求教于陈健民同志。有的译句采纳了潘德恒同志和李先荣同志的建议。对以上各位同志，译者均表示深切的谢意。

谢 庚

1981年6月

目 录

第一篇 火炮内弹道学引论与 一个简化的内弹道模型 1	I 引言..... 29
摘要..... 1	II 通用的火炮模型的类型..... 29
符号名称..... 1	A 基本情况..... 29
I 引言..... 3	B 通用模型的分类..... 30
II 弹道问题的论述..... 4	C 最佳火炮模型..... 34
A 弹道过程..... 4	III 模型在解内弹道学问题时的作用..... 35
B 火炮系统: 一般说明..... 5	A 火炮中压力波的减少..... 35
C 炮管..... 6	B 发射药验收试验的模拟法..... 36
D 弹丸设计与稳定性..... 7	C 新火炮的设计..... 40
E 能量分配..... 8	D 现有火炮性能的改进..... 42
F 压强-行程曲线..... 8	IV 内弹道编码预计值和 实验数据的符合..... 43
G 火炮系统的效率和装药..... 10	V 内弹道模型的输入数据..... 46
III 炮用发射药的论述..... 10	VI 讨论与结论..... 49
A 炮用火药..... 10	参考文献..... 50
B 炮用发射药的特性..... 11	第三篇 应用于轻兵器系统的 内弹道模型 53
C 炮用发射药的点火..... 13	摘要..... 53
D 发射药药粒的燃烧..... 14	符号名称..... 53
E 药粒特性对火炮性能的效应..... 15	I 引言..... 53
F 炮用发射药的能量: 一般注释..... 16	II 经验模型..... 55
IV 一个弹道模型..... 17	III 分析的内弹道模型..... 57
A 问题的探讨..... 17	A 发射药钝感技术..... 57
B 状态方程..... 18	B 分析..... 58
C 形状函数分析..... 18	IV 专门化内弹道模型..... 61
D 燃烧速率方程..... 19	V 轻兵器内弹道学中的特别课题..... 62
E 容积变化的研究..... 20	VI 轻兵器中气体传送系统..... 62
F 压强的研究..... 21	VII 轻兵器系统中的压力波..... 63
G 弹丸运动..... 21	VIII 结论..... 65
H 散热损失效应..... 23	参考文献..... 65
I 假设综述..... 24	第四篇 应用于速射火炮的内弹道学 69
J 基本方程系的总括..... 24	摘要..... 69
V 例题计算: 标准火炮- 发射药系统..... 25	符号名称..... 69
参考文献..... 28	I 内弹道模型..... 70
第二篇 实用火炮内弹道分析 29	II 压强、密度与速度等的梯度..... 72
摘要..... 29	

III 炮口焰	77	膨胀的方程系的重述	109
IV 对炮管的热传导	81	B 实际上相当药室无限长, $D_0/D_1 = 1$, PP火炮的特征线方程系	110
V 通过炮管的热传递	84	C 在 $D_0/D_1 = 1$, $x_0 = \infty$, PP火炮中声惯量的作用	111
VI 结束语	87	D 弹丸运动方程式	111
参考文献	88	E 在 $D_0/D_1 = 1$, $x_0 = \infty$, PP火炮中理想发射药气体的方程系	111
第五篇 无坐力炮内弹道学的		F 在 $D_0/D_1 = 1$, $x_0 = \infty$, PPIG火炮中被推进的弹丸运动方程系	112
数学模型	89	G 有限药室长度, $D_0/D_1 = 1$, PP火炮	114
摘要	89	IV 坡膛发射药预燃火炮	116
I 引言	89	A 坡膛PP火炮的气体动力学方程	116
II 数学模型的物理基础	90	B $x_0 = \infty$, 坡膛PPIG火炮的方程系	116
A 模型的目的是和局限性	90	C 在 $x_0 = \infty$, PPIG火炮中由于膛坡使弹丸速度的增加	117
B 基本假设	91	V 坡膛PPIG火炮中弹丸性能方面的完整数值结果	118
III 基本方程系	93	A 数值计算	118
A 身管中流动	93	B 坡膛PPIG火炮的数值结果	118
B 燃烧药室	94	VI 在身管中弹丸前面的气体的影响	121
C 通过喷管的流动	96	VII 等熵理论对火炮的适用性	121
IV 边界条件	96	A 火炮的内弹道过程是否等熵?	121
A 概要	96	B 发射药加热的火炮的实验结果	122
B 在弹底的边界条件	97	C 非等熵性的效应的分析研究	122
C 敞开的炮口边界条件	98	D 关于计及边界层与弹丸摩擦的方法的结论	123
D 药室与身管间的边界	98	VIII 加热发射药的方法	124
V 推力计算	99	A 利用化学反应的热量	124
VI 噪声估计	100	B 利用电加热	124
VII 数值模型	101	C 激波加热	124
VIII 举例: 典型结果	101	D 双级火炮: 一般说明	125
IX 对模型改进的见解	104	E 双级火炮: 用电子计算机的性能计算	125
参考文献	104	IX 定常-弹底-压强火炮	127
第六篇 高炮口速度火炮的理论	106	A 维持一定常-弹底-压强的概念	127
摘要	106	B 在坡膛火炮中获得定常-弹底-压强火炮时的压强条件	127
I 引言	106	C 实现所期望的药室压强变化的	
A 高速炮	106		
B 高速炮的基本要求	107		
C 利用定常-弹底-压强发射药可达到的速度	108		
II 发射药预燃火炮(PP炮):			
概要	108		
A 发射药预燃火炮的描述	108		
B 在气体中传播的扰动方程系	109		
III 等直径的发射药预燃火炮	109		
A 在等截面炮管中应用于等熵气体			

方法	128
X 发射药气体的非理想性对于发射药预燃火炮的性能的影响	129
A 发射药气体性能的准则	129
B 计算在实际发射药气体下的火炮性能	129
XI 关于弹丸速度的评论: 现在与将来	131
A 发射药的选择	131
B 增加弹丸速度的建议性方案	131
C 今后的任务	134
参考书目	134
参考文献	135
第七篇 火炮中两相流的模拟	140
摘要	140
符号名称	140
I 引言	141
II 物理问题的性质	142
III 模型的性质	144
IV 理论与实验的符合	145
V 不均质两相流的平衡方程系	145
VI 数学闭包与本构定律	150
VII 平衡方程系的结构	152
VIII 解的各种方法	153
IX 结束语	153
参考文献	154
第八篇 装药设计问题和它们对火炮中压力波的效应	157
摘要	157
I 引言	157
II 压力波现象论	158
III 实验研究	160
IV 影响压力波的装药设计因素	161
A 点火激发源	162
B 质量燃烧速率	164
C 透气性	166
D 药室与装药的几何形状	168
V 可靠的火炮点火	172
VI 结论	175
参考文献	175

第九篇 粒状发射药的枪炮装药中的点火与火焰传播现象	179
摘要	179
I 引言	179
II 点火装置与发射药之间的反应	181
III 轻兵器系统	183
IV 大口径火炮	185
V 摘要与结论	190
参考文献	190
第十篇 相对陡度作为炮口速度的精确度量的适用性	193
摘要	193
符号名称	193
I 引言	194
II 分析	195
III 敏感度研究	196
IV 数据箱的影响系数及其与炮口速度数据的比较	197
V 根据密闭爆发器试验预计炮口速度的一个建议性方法	199
VI 结论	201
参考文献	202
第十一篇 弹道性能对发射药燃烧性质的敏感度	203
摘要	203
I 引言	203
II 实验计划	204
A 密闭爆发器分析	209
B 对M6MPf/175毫米发射药的一般实验程序	210
C 两个两个的实验计划: 阶段 I 与 II	210
D 两个两个的实验计划: 阶段 III 与 IV	211
E 加工与试验(两种实验计划)	211
F 对M1MPf/155毫米发射药的实验计划	215
III 预计方法	217
A 密闭爆发器研究	217
B 数学模型研究	219

C 模型的说明	219	F 烧蚀性燃烧	251
IV 预计结果与实验结果的比较	220	G 动态燃烧	251
V 结束语	221	V 物理性质	251
参考文献	222	VI 装药设计研究	252
第十二篇 应用于内弹道学中的		VII 可燃性与安全性	253
研究性测试技术	223	参考文献	254
摘要	223	第十四篇 内弹道学计算中用的状态	
I 引言	223	方程与热力学数据	259
II 仪器设备	224	摘要	259
A 压强测量	224	I 引言	259
B 热传感器(热敏元件)	225	II 用在弹道计算中的经验状态	
C 光学技术	227	方程	261
D 弹丸速度和行程	228	III 求较根本的状态方程时的分子	
E 挤进力与膛内摩擦力	230	算法	262
III 研究用的装置与技术	231	IV 理论方法	264
A 部件试验	231	V 物理参量的推导	268
B 点火系列的试验装置	233	A 纯水	268
C 排气药室	235	B “假水”	269
D 装备仪表的火炮	236	C 二氧化碳	269
E 弹道模拟器装置	237	D 氮分子	270
F 自由炮尾装置	238	E 一氧化碳	270
G 鉴定特性的液体发射药炮(LPG)		F 氢分子	271
测试装置	240	G 水/二氧化碳的相互作用	
IV 结束语	240	第二维里系数	271
参考文献	240	VI 和截短的维里方程的比较:	
第十三篇 枪炮发射药	243	纯水	271
摘要	243	VII 结论	273
I 基础知识	243	附录A 计算 H_2O , CO_2 , N_2 , CO , H_2 等气体的混合性质的提纲	273
A 制造过程	243	附录B 计算哈尔-申克尔状态方程的 亥姆霍兹能量的提纲	274
B 用于发射药领域中的普通名词 术语	244	附录C 其他热力学量	275
II 化学成分	245	参考文献	275
A 传统发射药	245	第十五篇 美国陆军弹道研究所	
B 发展中的发射药	245	(BRL)的枪炮内弹道学方面的	
III 热化学	248	历史瞻顾	278
IV 燃烧速率	249	摘要	278
A 测量	249	I 引言	278
B 燃烧速率值	250	II 第一次世界大战期间陆军内弹 道学	278
C 调整温度的效应	250	III 从1919年到1940年的陆军内	
D 和火焰温度的关连性	250		
E 钝感发射药的燃烧速率	250		