

内弹道实验原理

华东工程学院《内弹道实验原理》编写组

国防工业出版社

内 容 简 介

本书既介绍了传统的内弹道实验方法及其理论根据,也介绍了现代内弹道实验技术。全书共七章。第一章介绍火药气体压力测量,第二章介绍弹丸速度测量,第三章介绍温度测量,第四章介绍内弹道高速摄影,第五章介绍记录装置,第六章介绍火药的静态分析,第七章介绍误差理论及数据处理。

内弹道实验原理

华东工程学院

《内弹道实验原理》编写组

*

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

*

850×1168¹/₃₂ 印张14¹/₈ 358千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数: 0,001—1,200册

统一书号: 15034·2735 定价: 2.10元

前 言

本书是根据内弹道专业教学计划中的《内弹道实验原理》教学大纲编写的。全书按测量技术的基础理论、被测非电量的变换、传输、放大、记录、处理以及测量系统的误差分析加以介绍。重点讨论内弹道参量测量的基本概念、基本理论、变换元件、测量仪器及测试系统的组成和设计的基本原理。

本书共七章。其中包括火药气体压力的测量、弹丸速度的测量、温度的测量、高速摄影在内弹道中的应用、常用记录仪器介绍、火药的静态分析法及误差理论和实验数据的处理等部分。

本书可作为内弹道专业的试用教材，也可作为枪、炮、弹药等有关专业的教学参考书。

本书初稿曾于1980年油印出版。初稿编写由焦化南同志担任主编，参加编写的有曲作家、官汉章、朱之震、王普法、陈正元、张兆钧、张容珍、刘俭、靳开森、李佩玲等同志。初稿经过两年教学实践及试用后，由官汉章、焦化南、朱之震、邹瑞荣同志作了相应的修改和补充。在编写过程中曾得到总后三十一基地梁宝山、641厂郭增贵等同志以及有关靶场和工厂的热情支持，对此深表谢意。

由于我们水平有限、时间短促，无论从体系、内容及编写方法等方面都存在着许多缺点和不足，希读者批评指正。

1983年2月

目 录

绪 论	5
第一章 火药气体压力的测量方法	11
§ 1.1 概述	11
§ 1.2 铜柱测压法	14
§ 1.2-1 测压铜柱和铜柱测压器	14
§ 1.2-2 测压铜柱的校准和压力核对表的编制	18
§ 1.2-3 铜柱测压换算方法	25
§ 1.2-4 铜柱测压法的误差	30
§ 1.2-5 铜柱变形量压力表的编制与使用	38
§ 1.3 弹性变形测压法的基础	43
§ 1.3-1 概述	43
§ 1.3-2 传感器的动特性	46
§ 1.3-3 传感器固有频率的计算与测定	56
§ 1.4 应变电阻测压法	66
§ 1.4-1 概述	66
§ 1.4-2 应变电阻压力传感器	68
§ 1.4-3 测量电路与应变仪	102
§ 1.5 压电测压法	130
§ 1.5-1 压电测压传感器	131
§ 1.5-2 测量电路及放大器	139
§ 1.6 压力标定	153
第二章 弹丸速度的测量	159
§ 2.1 概述	159
§ 2.2 利用电子测时仪测定弹丸速度	164
§ 2.2-1 电子测时仪测速设备各部分的作用原理和要求	166
§ 2.2-2 利用电子测时仪测弹丸速度的误差分析	194
§ 2.3 多卜勒雷达测速	198
§ 2.3-1 概述	198
§ 2.3-2 640-1型雷达的工作原理	199
§ 2.3-3 雷达测速的修正与初速换算	206
§ 2.4 用内弹道测速雷达测弹丸在膛内的运动规律	211

VI

§ 2.4-1 概述	211
§ 2.4-2 工作原理	212
§ 2.4-3 数字终端设备	215
§ 2.4-4 使用膛内测速雷达中的几个问题	219
第三章 温度的测量	223
§ 3.1 炮管膛壁温度的测量	223
§ 3.1-1 测量膛壁温度的意义	223
§ 3.1-2 膛壁温度测试的原理和方法	223
§ 3.2 炮口温度的测量	231
§ 3.2-1 炮口温度测量的意义和原理	231
§ 3.2-2 测量方法简介	232
§ 3.2-3 数据简化	234
§ 3.3 火炮膛内火药气体温度的测量	238
§ 3.3-1 概述	238
§ 3.3-2 辐射方程	240
§ 3.3-3 比色温度	244
§ 3.3-4 比色测温装置	245
第四章 内弹道高速摄影	253
§ 4.1 高速摄影在内弹道研究中的意义	253
§ 4.2 闪光照像法	254
§ 4.3 脉冲 x 光摄影	269
§ 4.4 其它摄影法	273
第五章 记录装置	277
§ 5.1 概述	277
§ 5.2 振子示波器	278
§ 5.3 电子示波器	309
§ 5.4 磁带记录器	326
第六章 火药的静态分析法	343
§ 6.1 概述	343
§ 6.2 实验装置	344
§ 6.3 火药力和火药气体余容的测定	348
§ 6.4 燃烧速度定律及压力全冲量的测定方法	359
§ 6.5 火药烧蚀性的测量方法	364
第七章 误差理论及数据处理	367
§ 7.1 误差理论基础	367

§ 7.1-1	测量误差	367
§ 7.1-2	有效数字及其计算法则	373
§ 7.1-3	误差理论基础	377
§ 7.1-4	间接测量误差的计算	395
§ 7.1-5	非等精度测量的误差	409
§ 7.2	数据处理	416
§ 7.2-1	实验数据的表格表示法	416
§ 7.2-2	实验数据图形表示法	418
§ 7.2-3	实验数据的方程表示法	428

主要符号

- A ——振幅
 A_b ——振幅比
 a ——当地音速
 B ——磁感应强度
 c ——电容
 C ——阻尼系数
 d ——弹丸直径
 E ——弹性模量
 e ——感应电势
 F ——作用力
 f ——信号频率
 f_0 ——固有频率
 g ——重力加速度
 h ——阻尼度
 h ——钢柱压后高
 I ——电流
 i ——弹形系数
 J ——转动惯量
 L ——电感
 M_1 ——电磁力矩
 M_2 ——扭转力矩
 m ——质量
 n ——线圈匝数
 P ——压力
 P_m ——最大压力

- Q —— 载荷
 Q —— 电荷量
 q —— 弹丸重量
 R —— 电阻
 S —— 活塞面积
 T —— 周期
 t —— 时间
 t —— 温度
 U —— 电压
 V —— 残余误差
 v —— 弹丸速度
 v_0 —— 弹丸初速
 z —— 某物理量的真值
 α —— 铜柱硬度系数
 α —— 弹头波的半顶角
 β —— 阻尼因素
 γ —— 阻尼比
 γ —— 中间误差(或然误差)
 γ_{v_0} —— 初速或然误差
 Δ —— 绝对误差
 Δv_c —— 弹丸速度修正量
 $\Delta D(v)$ —— 西亚切主要函数 $D(v)$ 的增量
 δ —— 相对误差
 ε —— 铜柱塑性变形量
 λ —— 频率比
 λ —— 波长
 μ —— 泊松比
 ρ —— 电阻率
 ρ, r —— 密度
 Σ —— 求和

- σ —— 应力
- σ —— 均方根误差(标准误差)
- τ_m —— 压力增长持续时间
- τ_0 —— 传感器固有振动周期
- Φ —— 磁通
- ψ —— 全磁通
- ω —— 信号角频率
- ω_0 —— 固有角频率
- ω_r —— 振动角频率

绪 论

§ 1 发展内弹道试验的意义

翻开弹道学的发展历史，可以清楚地看出弹道试验是理论弹道学发展的前驱。

弹道学这门应用科学是随着射击武器的发展而形成的。根据史书的记载，大约在公元10世纪已经有了火器。那时，人们首先是依据经验来处理发射时碰到的各种问题。例如对于火炮，关心的主要是火炮中装多少火药，发射一个多重的弹丸，会不会引起膛炸，炮身放置成怎样的角度，弹丸可以打多远等。一直到18世纪中，鲁宾斯 (Robins, 1740年) 第一次用实验的方法，测出了小口径武器的初速。从这时起，弹道学才开始区分为内弹道学和外弹道学两个分支。而当时的内弹道理论和实验水平是相对应的，只限于用经验方法去寻求弹丸和装药重量以及火炮结构尺寸与初速的有关公式。一直到了19世纪60年代诺贝尔 (Noble, 1860年) 利用铜柱测压器，测得了膛内火药气体最大压力之后，才逐渐形成内弹道学的学科体系。差不多在同一时期，发明了布朗节测速仪 (Boulouge chronograph)，代替了古老的弹道摆测速法。时隔不久，为了研究火药的燃烧问题，开始使用密闭爆发器。在1880年，维也里 (Vieille) 在密闭爆发器上，用铜柱测压记录装置，测出了 $p-t$ 曲线。从而根据密闭爆发器的实验结果，可以给出弹道理论上所使用的发射药的一些重要特征量。可是，此后的50年时间内，很难在火炮上，特别是大口径火炮上获得实验的 $p-t$ 曲线。其困难就在于火炮的后座干扰了记录。由于实验是这样水平，因此在1930年以前的内弹道理论主要是从已知火炮和弹丸的某些特征量，以及从密闭爆发器实验得到的火药特征

量来估算火炮的初速和最大膛压。尽管当时在理论上也经常讨论膛内 $p-t$ 曲线问题，也只能是没有实验的推测。大约在1914~1918年之间，由汤姆逊 (Thmson) 提出了使用压电测压法，测定膛内 $p-t$ 曲线。大约在1930年左右，这种原理的测试系统才较完整和可靠地记录出膛内的 $p-t$ 曲线。从此以后，内弹道理论就以研究射击现象整个时间过程为主，而不只是研究少数几个突出的弹道诸元的问题了。在第二次大战中，发展了目前广泛应用的应变测压法和电子测时仪。50年代和60年代，完成了微波干涉仪的研制，从而可以用实验方法测出弹丸在膛内的行程 (l)-时间 (t) 曲线。在这种技术的基础之上，进一步发展、研制了弹丸内部各种输出讯号的遥测系统。同一时期，还用在弹丸和火药药粒中放置放射源的方法，这不仅同样可以测出膛内弹丸的行程-时间曲线，甚至还可以测出某些药粒在射击时的运动规律。通过这些手段把封闭在身管内部的，转瞬即逝的射击现象，从多方面展现在我们的面前。内弹道理论也随之取得了长足的进展，开始研究射击时装药运动规律了。

从另一方面讲，从理论上研究一个复杂的射击现象有必要做出某些合理的假设，把问题转化成一定条件下的物理模型和数学模型。因此，不论哪一种内弹道理论用于解决武器设计中的实际工程问题都是相对正确的，或者说是存在误差的。只有在用弹道试验方法确定出某些必需的起始参量和符合系数之后，内弹道理论才具有应用价值。因此，内弹道试验是弹道学工作者最关注的一个实际问题。也是那些应用内弹道理论去解决兵器研制实际问题的科学工作者和工程技术人员比较难掌握的。他们的困难不在于对内弹道理论的消化和理解，而是苦于不知道如何取定起始参量。其实，这只有靠弹道试验来解决。而且内弹道理论中的许多基本方程是以实验为基础的唯一方程，这就更需要试验作为理论的支柱了。例如，描述火药燃烧的几何燃烧定律、燃烧速度定律、气体状态方程以及传热方程等都是试验方程。因此可以说，任何一种内弹道理论都是建立在一定的内弹道试验方法基础之上的。

研究内弹道试验还具有很大的实用价值。因为目前评价武器性能的优劣, 鉴定武器生产是否合格, 判断现装备和贮存的武器(含弹药)是否勘用等关键性问题, 最基本的依据(当然不是唯一的)是内弹道试验结果。所以内弹道试验是兵器生产工厂、兵器研究单位和国家鉴定单位必备的基本测试手段之一。

§ 2 内弹道试验的特点和基本方法

在内弹道学的理论教材中, 对射击现象已经有了比较详尽的描述。并且指出, 射击现象具有压力和温度变化幅度大、弹丸运动的速度和加速度高、射击过程时间短的特点。即通常所归纳的三高一短(膛压高、温度高、速度高、时间短)的特点, 这就给弹道测试带来了很大的困难。从实验角度看, 还有另一方面的困难。这就是变化剧烈的射击现象有许多是在封闭的身管中进行的, 使得观察变化状态和获取数据都有许多不便之处。因此, 内弹道试验所用的方法有着特殊的要求, 比如要能克服身管屏蔽的障碍、要能承受高温、高压和高加速度; 量程要宽; 要有良好的动态频率响应; 要有快速综合处理数据的能力等。由于这些特点, 形成了一套独特的弹道试验方法, 逐渐形成了实验内弹道学这一门学科。

常用的内弹道试验方法可以分为三类:

(1) 机械方法。就是把被测量经过机械传递, 利用机械方法记录下来。这是出现较早的方法, 应用起来简单可靠, 不需要很多仪器, 但精度往往不好, 同时很难准确地记录全部变化过程。目前这种方法在内弹道试验中仍占有重要的地位。例如: 铜柱测压法, 弹道摆测推力等。

(2) 非电量电测法。就是把被测量转换为电讯号, 再进行记录和测量。由于这种方法可以把快速变化过程不失真的记录下来, 所以更适合于内弹道试验的需要。非电量电测法的关键是如何把各种物理量转换成电量。完成这种转化的仪器称为变换器或传感器。电测法的精度, 在很大程度上, 取决于变换器的选择和设计。由变换器再加上放大器、记录器、校核设备、数据处理设备等部

分，共同组成了完整的电测系统。

(3) 直接观察和快速照相法。它在弹道测试上，主要用高速摄影来实现，且占重要地位。有人把它比作天文学上的望远镜，生物学上的显微镜，不是没有道理的。但是由于身管的障碍，这种方法最初主要是用在炮口各种现象的观察和研究上。观察所用光源，较早使用火花隙作为光源，现在大多使用频闪光源。为了观测膛内的变化过程，首先提出的是使用脉冲 x 光摄影，继而提出了使用一般高速摄影配合专门制做的透明身管。最近又提出了中子照相等新方法。这些方法各有其利弊，使用都不是很方便，因此尚未普及。

对于上述三种方法，本书都择要做了一些介绍，特别是电测法介绍的较多。但由于本书的任务主要是作为一本教材，想使学生通过本书首先学到那些最常用，最基本的弹道测试方法，所以采录的内容偏于实用。它反映了国内和国外常规试验方法的一般水平。对那些供专门试验用的仪器和方法几乎没有涉及。为弥补不足，在下节将提供一些弹道试验发展的线索。望读者切不可划地为牢，囿于本书范围，来谈内弹道测试问题。

§ 3 内弹道试验的发展

近十几年来，随着科学技术的发展，弹道测试技术也在迅速地改变面貌。要勾画出它的发展前景是相当困难的。应当说，凡是能用于研究射击现象的技术领域和科学方法都是有价值的。但这种提法太笼统了，下面仅就可预见的几个方面提供一些线索，以供参考。

(1) 弹道装置。这是指那些为了一定的内弹道试验目的所设计和提供的专用装置。如早为大家所熟知的密闭爆发器、半密闭爆发器、烧蚀管、燃速测定仪（等压弹）等。这些传统的弹道装置，名称虽然还是老的，但近几年已达到了新的技术水平。例如：在1973年国际枪炮发射药会议上，介绍了法国能承受20千巴（约为20400公斤/厘米²）的高压密闭爆发器；1977年第三届国际弹

道会议上, 圣路易斯德法研究院 (ISL) 发表了微形 高压密闭爆发器。美国陆军弹道研究所 (BRL) 使用了开有观察窗的密闭爆发器和燃烧室。国外还比较广泛地应用激波管研究压力波的传播和对流换热条件下的火药燃烧规律性。轻质气体火炮是获得高初速 (2500米/秒以上) 的专用弹道装置, 多在宇航研究上应用。为了得到更接近炮膛真实情况下装药的燃烧规律, 使用了各种口径的弹道模拟器, 较逼真地再现了射击时装药燃烧和运动情况。这些弹道装置, 不仅可以提供我们所期望的某些特定的环境, 而更重要的是可以进行弹道模拟, 用小型试验代替大型试验, 用静态方法代替动态方法, 用较为节省的实验室试验代替实弹射击。

(2) 传感器和电测系统。由于内弹道的全过程(时间), 大都是在毫秒级的范围内, 而目前弹道电测系统的频率响应范围大约在几K到几十K, 因此, 基本上还是适应的, 但有时显得不足。尤其是近年来已进一步深入要求研究内弹道过程中的某一个时间区间内所发生的现象, 如要求剖析点火过程、挤进过程、炮口后效期等这些特征时间更短的子过程。这就对测试系统频率响应提出了更高的要求, 特别是要求有高频响的传感器。就所测的物理量看, 测温技术要比测压技术更困难, 目前存在的问题更多一些。弹道工作者集中力量要解决的另一个实际问题就是想改变目前这种动态测量, 静态标定的不合理作法, 建立起动态标定的方法。

(3) 开拓新领域。弹道测试的常测物理量都是宏观量如压强、温度、行程、时间等。但随研究问题的深入, 特别是随着物理气体动力学的发展, 开始应用微观分析方法来解释宏观气流参量。因此弹道测试也开始使用诸如电子扫描显微镜、分析高能物质的质谱仪、分子光束取样系统、红外分光仪、拉曼分光仪、电子自旋共振分光仪等仪器, 来研究火药燃烧过程、反应的中间产物、燃气中的分子组成、以及离子和自由基含量等问题。

(4) 电子计算机的应用。在弹道测试上应用电子计算机意义是广泛的。目前已见诸实践的有: 对弹道测试进行程序控制和数据处理。如奥地利阿维尔 (AVL)公司弹道分部, 发展了一种

阿维尔计算机火药数据处理系统和标准程序。可迅速根据实验结果计算出火药力、余容、燃速系数、燃速指数和药形函数。我国也研制成功弹道参数综合测量系统。较为特出的是美国陆军弹道研究所(BRL)已建立了一个大、中口径火炮内弹道、中间弹道、外弹道起始段弹丸-火炮动力设备。在这个测试系统中,可求得弹丸的角运动、弹丸的轴位移、弹丸与炮管间接触力的轴向分布、弹丸前后及周围的压力、炮管运动、炮口角位移、炮身后坐、初速、炮管与后坐装置的相互作用、弹夹的分解与定位以及弹夹的冲击等多种物理量。

(5) 靶场及其它设施。应当承认,实弹射击还是目前弹道试验的基本手段。当前世界上兵器工业较为发达的国家都建有一些著名的靶场。靶场指挥、通讯、观测和众多的试验辅助设备也在不断的更新,如激光自动测距、自动报靶、弹丸的软回收器、自动控制中心等都已见应用。

总之弹道试验的发展领域是宽广的。概括地对测试系统提出的要求是:模拟要逼真,反应要快速,量程要加大、观察要细微,试验要安全、结果要正确、工作要省时,消耗要经济,仪器结构和操作力求简单可靠。随着科学技术发展,这些要求并非苛刻,弹道测试技术会日臻完善,实验弹道学的内容必然会更加丰富。

第一章 火药气体压力的测量方法

§ 1.1 概 述

一、在内弹道试验中，测量火药气体压力有很大的实际意义和理论意义

根据火药在定容中燃烧测量得到的压力随时间变化的实验曲线，可以进行火药的弹道分析，确定各种火药的火药力 f 、余容 α 、压力全冲量 I_k 以及火药的燃烧速度定律等等。这些量不仅标志着火药的弹道性能，而且也是弹道计算中的重要弹道特征量。

根据火炮射击时测得的膛内压力随时间变化的实验曲线，可以验证各种弹道理论与实际所测得结果的符合程度，确定弹道计算中某些符合系数的数值。而炮膛内的最大压力值对炮身、炮架、火炮各部分机构的强度以及对引信动作的正确性有很大影响。因此，在工厂、部队和靶场，常常用火药气体的最大压力作为检验试验和验收试验时评定火炮、火药装药和弹丸的弹道性能好坏的重要指标之一。

二、测量压力的主要方法

压力 $P = F/S$ 是单位面积上所受的力。在面积 S 一定的条件下，只要测出力 F 即可得到压力。因此测量压力的原理是以力学定律

(1) $F = R$ (力等于变形物体的阻力) 和

$$(2) \quad F = m \frac{dv}{dt}$$

为基础的。以第(1)个定律为基础的测压方法，一般都采用静力标定，所以称为静力测压法。这种方法是使力作用到不动的物体上，并使它变形，根据变形量的大小可以确定力的大小。也可将