内弹道学

下 册

M.E.谢列伯梁可夫著

国防工业出版社

內彈道学

下冊

炮兵科学院院士、技术科学博士
M.E.謝列伯梁可夫 著
郝永昭 譯
鮑廷鈺、張柗 校
張述祖 审校

國防工業出版社

М. Е. Серебряков
ВНУТРЕННЯЯ
БАЛЛИСТИКА
Государственное
издательство оборонной промышленности
Москва—1949
本書系根据苏联国防工业出版社
一九四九年俄文版譯出

內彈道学

〔苏〕謝列伯梁可夫 著
郝永昭 譯
鮑廷鈺、張枌 校
張述祖 审校

国防工业出版社 出版
北京市書刊出版业营业許可証出字第074号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店发行

850×1168 耗 1/32 · 14 10/16 印張 · 323 千字
一九五八年十二月第一版
一九五八年十二月北京第一次印刷
印数：1—1,500册 定价：(11) 3.00 元
NO. 2043 統一書号：15034·258

目　录

第二部分

內彈道問題解法的理論和实踐

（理論火葯燃燒动力学和实用火葯燃燒动力学）

第三部分

复杂情况的內彈道学問題的解法

附　录

第二部分

內彈道問題解法的理論和实踐

(理論火藥燃燒动力学和实用火藥燃燒动力学)

緒　論

根据射击时所发生的現象和过程的全面研究，內彈道学应当建立联系着各种装塡条件及与装塡条件有关的所謂射击彈道諸元各量之間的規律，并应給出解决实踐上所遇到的很多問題的方法。

建立这些能够控制射击現象的規律是內彈道学的一般問題。

装塡条件包括有：药室和炮膛的大小、炮身的重量、膛綫的构造、彈丸的重量和构造、决定于彈带和膛綫构造的挤进压力、装葯量、火葯的标記、火葯的物理化学和彈道特征量、气体膨脹的特征量。

射击彈道諸元包括有：随时間变化的彈丸行程 l、彈丸速度 v、火葯气体压力 p 及其温度 T，以及到某瞬間所生成的气体量 $\omega\psi$。

在解决上述內彈道学一般問題时，可以分为两个最重要的火葯燃燒动力学的基本問題和一些特殊的問題。

火药燃燒动力学的第一个基本問題是：在指定装填条件下用計算法确定作为彈丸行程和时間的函数的膛內气体压力和彈丸速度的变化。这时除了确定 $p—l$、$v—l$、$p—t$、$v—t$ 曲綫之外还要确定两个最重要的火炮彈道特征量，即膛內气体最大压力 p_m 和彈丸的炮口速度 $v_д$，也就是彈丸从膛內射出时的速度。这个問題可以称为火药燃燒动力学的正面問題。

当給定装填条件时这个問題仅有唯一的解，也就是有唯一的压力曲綫和最大值 p_m，以及唯一的彈丸速度曲綫和炮口速度 $v_д$。

改变装填条件即可进行分析这些条件对气体压力曲綫和彈丸速度曲綫变化的影响，也就是解决一些与解正面問題有关的个别問題。

火药燃燒动力学的第二个基本問題——火炮彈道設計的問題——就是：确定出炮膛的构造諸元和装填条件，以保証已定口徑和重量的彈丸在射出时获得一定的初速（炮口速度）。这个速度則是根据对所設計火炮提出的战术技术要求所給定的。

在解这个問題时一般都給出气体的最大压力。

由于这个問題的解决就給出保証已定口徑和重量的彈丸得到給定速度的构造諸元和装填条件。然后对这些装填条件計算出作为行程和时間函数的气体压力曲綫和彈丸速度曲綫，也就是根据选定了的火炮和装药的方案来解决內彈道学的正面問題。

为了計算炮身壁和彈丸壁的强度，設計人員利用所得到的 $p—l$曲綫，而为了計算炮架构造和时間点火信管与引信，則利用 $p—t$曲綫。与此同时还給出应在工厂制造的火药厚度和形状。

因此，所有整个火炮系統及其彈药的設計在极大程度上决定于选出的彈道解决方案的正确与合理。

这就是为什么火炮的彈道設計問題是內彈道学主要的实用問題。

彈道設計的問題比第一个問題更为广泛，并且作为完成阶段包括有第一个問題在內，按其本質来說就是內彈道学的反面問題。它是容許多解的，即保証已定口徑和重量的彈丸得到給定初速所

需的結构諸元与装塡条件的組合是很多的。

由于解法的不确定而发生用最簡便的途徑拟定一定解法以获得所需答案的問題，以从多解之中选擇符合于对所設計火炮提出的战术技术要求的最合理和最有利的解。

这就提出了关于求出最有利的解、最大威力火炮、最小长或最小容积火炮及最有利的装药和装塡条件的特殊問題。

这些特殊問題的解决就使在計及最有利的解和战术技术要求下有可能提出彈道設計的一般理論和方法的拟定問題。

除上述的內彈道学基本問題外，还有下面举出的一些特殊的和次要的問題。

对一定的炮身和一定彈丸重量計算保証得到一定炮口速度 $v_д$ 的装药量 ω 和給出所需的最大压力 p_m 的火药厚度 $2e_1$。

由于射击現象的复杂性，所以并非所有的現象都可以計算，甚至連近似地計算也不可能；其中有些現象必須加以放弃，并且在表示射击时发生的各个过程相互联系的数学关系式中也不把它們包括在內。

所以內彈道学的各方程仅給出 p、v、l、ψ 和 t 的近似值。因为对实用方面来說借它們的帮助我們需要得到与实驗数据相符合的結果，所以为了这种一致性必須解决选擇某些恒定特征量方面的問題，以便它們在代入方程时給出与射击結果相符合的气体的 p_m 和彈丸的 $v_д$。

提出这个問題的本身就說明对射击时的所有現象还沒有完全了解和研究。所以今后迫切需要解决的內彈道学主要問題之一就是准确地确定常数的問題，主要是根据火药的物理化学特性确定火药的常数。火药常数的确定与精确实驗測定压力的方法有关，因为根据压力的大小来确定所有的彈道特征量（f、α、u_1）。

除了所举出的問題之外，应当提出在装塡条件有一定变化时确定气体最大压力和彈丸初速变化方面的問題，以及一些其他問題。

主要的射击諸元——l、v、p、T、ψ 和 t——是由表現射击时所

发生的各主要过程的方程系而彼此联系着，这些过程即：火药的燃燒和气体的生成，气体的热能变为彈丸—装药—炮身系統的动能及該系統各部分的运动。

解决理論火药燃燒动力学問題的方法应当使我們可能計算和作出气体压力和彈丸速度与彈丸沿膛內运动的行程和时間的关系，也就是解决內彈道学基本的正面問題。

解决火药燃燒动力学問題的方法可分为分析法、数值法、經驗法和表解法。

当还沒有足够完全和詳細地拟定出內彈道学的理論基础之前，經驗法具有重要的意义。

經驗法是利用比較簡单的經驗公式做基础的，而这些公式都是簡化地表达出从实驗得到的射击諸元彼此之間的关系。除采用公式外还采用可能迅速計算气体压力曲綫和彈丸速度曲綫諸元的一些表。

經驗法是由整理在不同的条件下射击时所得到的实驗数据的結果而出現的，并且其中包括的特征量和常量是由实驗条件所决定。

这种方法（經驗公式和表）的缺点是它們沒有考虑到一些很重要的因素和装塡条件的影响，并且一定要在編定它們的条件和范圍之內才可以使用它們。

經驗公式和表的数目是很多的；由于它們本身很簡单，所以在分析法拟定之前它們曾有特殊的意义。但是当相当充分地估計到大多数装塡条件和射击时所发生过程特点的影响的准确理論解法出現后，就使我們可以根据准确的解析关系解决所有的火药燃燒动力学基本問題。因此多数的經驗公式和表丧失了它本身的意义，現在只是在一些輔助的情况下才使用它們。

分析法是以一系列表征火药燃燒条件和气体、彈丸、火炮运动的假設作为基础的，而表示射击过程物理方面的大部分实驗数据或理論数据又奠定了作出这些假設的基础。

所以解决問題的分析法比經驗法更加深入，深入到現象的实

質，并且近于符合射击时所发生的过程本質。

在分析法的情况下問題归結于各种形式的微分方程的积分和求解。这可能比較准确地做到（这时得到比較复杂的公式），也可能近似地做到（导出比較簡单的关系式）。

不論是对实际上遇到的最复杂的情况，或者对明显图式化了的簡化情况，都能給予解法，这就使我們容易将所得到的关系式进行分析。

根据火药的几何燃燒定律和物理燃燒定律能够給出解法。

为了解問題时計算迅速和簡便起見，編有計算某些中間諸元所必須的輔助量或函数的表。

与分析法的同时，也采用微分方程系的数值积分法，一般利用有限差分，或者展成台劳級数。当一个或数个参量的数值在整个射击过程内变化着，并且它們的变化不可能在有限的形式下分析地解决問題时，只有在这种特别复杂情况下才采用这类方法。例如：在錐膛火炮中横断面的变化；在整个射击过程中随气体温度而变的参量 θ 的变化，或次要功計算系数 φ 的变化等等。

根据分析解法或数值法可以对各种装塡条件在某些通用常数的条件下編出各主要彈道諸元（p、v、l、t）的数值表，这些表使我們可以用最少的运算手續很快地作出所需要的 p—l 和 v—l 或 p—t和v—t曲綫。这样就大大地簡化和加速了解决正面問題的过程。通常这些表是对某些常量——火药特性和形状特征量——的平均值編出的，但是在实际上能够遇到的是与这些平均值有一些偏差的数值。这时在所得到的結果中应該引进相应的修正量。

所以用于解决火药燃燒动力学正面問題的彈道表实質上就是对一些具体的装塡条件轉化成数字的解析公式。

但是彈道表使我們可能解决一些利用解析公式所不能直接解决的問題。

表的数据与解析公式的主要区别如下：在解析公式中由于它的复杂性而沒有給出直接的关系，例如压力或速度与行程的关系；通常它們都是通过某一輔助变数来联系的。

在表里的主要射击諸元則是直接地彼此联系着：压力、彈丸速度及其沿炮膛运动的时間都以彈丸行程的函数給出，这就大大地簡化了解析，并且使我們可能拟出特殊法来解决分析法所不能解决的問題。

只是由于有了解决內彈道学問題的表，彈道設計理論才有可能发展。

这就說明了为什么我国Н.Ф.特拉仔德夫教授根据他1910年提出的精确解法所編出的最初的一些表具有重大意义。正是这些表簡化和加速了火炮彈道設計时的計算，并且使設計师們得到了迅速解决火药燃燒动力学反面問題的可靠工具。

这些表也是后来編出的一些更加詳細的各种表的典范。

第 六 篇

內彈道学正面問題的分析解法

基 本 假 設

在研究射击現象时已經指出了它的极端复杂性，并且也指出了对影响結果的某些因素的理解还不够。所以理論上解主要方程及推导射击时的物理化学和机械現象之間的关系式时，为簡化起見，必須采用一些假設。

基本的假設如下：

1．火药燃燒服从几何燃燒定律。

2．火药在平均压力 p 之下燃燒。

3．当气体絶热膨脹时燃燒生成物的成分不論在火药燃燒时間內或在火药燃完后都不改变（f 和 α 都是常数）。

4．火药燃燒速度与压力成正比：

$$u = u_1 p_{\circ}$$

5．被計算的次要功与彈丸前进运动的主要功成正比，并且利用系数 φ 来計算。

6．当在药室中由于燒掉一部分装药而产生足够使彈带挤进膛綫全部深度的挤进压力 p_0 时，彈丸开始运动；挤进的逐漸性和彈带阻力的增加不予計算。

7．彈带挤进的功不单独地計算，就象彈带逐漸挤进时彈丸速度增加不予計算一样。

8．发射时炮身壁的伸張、通过彈带和膛壁的間隙的气体冲出和空气阻力都忽略不計。

9．因膛壁的热散失所引起的气体冷却不直接計算，可以采

用間接方法計算(例如减低火药力 $f=RT_1$ 或增加 $\theta=\frac{1}{A+BT_{cp}}$)。

10．彈丸运动只研究到彈底通过炮口的瞬間。

11．取 $\theta=\frac{c_p}{c_w}-1$ 的値等于在整个发射时期中为一常数的平均值。

上面所列举的显然是把射击过程公式化了的，并且在某种程度上是与事实有偏差的假設，使得解題时所得到的一些关系式仅以某些近似値表示射击現象的物理力学的实質。同时根据这些关系式計算出的主要諸元的値（气体最大压力 p_m， 初速或炮口速度 $v_д$）可能同实驗所确定的并不一致。但是为了解决实际問題必須得到与实驗相一致的計算結果。所以考虑到射击現象的复杂性，对射击諸元理解不充分以及主要假設与射击时发生的实际情况的偏差，就必須在得到的常数中采用“与实驗一致的系数”。

类似的方法广泛运用于与用分析法不能計算所有細节的复杂現象有关的一些課目（流体力学，空气动力学等）中。

以后按照我們的知識发展程度可以使每个假設更加精准。并且計算尙未估計到的条件的影响。随着新实驗数据的积累和新方法的运用可能改变所得出的結論，甚至以其他更加准确和完善的結論来代替。

当解火药燃燒动力学基本方程时应当寻求尽可能大的数学上的准确性。但是，因为这时得到的某些关系式是很累贅的，另一方面甚至准确的公式也不能反映射击时的实际关系，所以在解題过程中可以采取一些簡化。

把这些簡化的解法与准确的解法比較，能够表明在相同的常数和条件之下它們的数学誤差的程度。

但是适当的选擇常数时在某些簡化解法的情况下有时也可以与仔細选擇常数的更加准确的解法一样，得到与实驗数据相当一致的計算結果。

第 一 章

在有挤进压力和几何燃燒定律的条件下主要問題的解法

如上所述，在火葯燃燒动力学的基本方程中包含有很多确定着装填条件的常量，即火炮、彈丸、装葯和火葯的特征量，以及被称为射击諸元的四个变量 ψ、v、l 和 p。

为了建立射击諸元之間的关系对基本方程补充有火葯燃燒方程和彈丸运动方程，这时出現变量——时間 t，而在几何的燃燒定律时出現 z 量。

結果得到下面的方程系：

火葯燃燒动力学的基本方程

$$ps(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi m v^2 \qquad (1)$$

火葯的燃燒速度定律

$$u = \frac{de}{dt} = u_1 p \qquad (2)$$

气体生成定律

$$\psi = \varkappa z(1 + \lambda z) = \varkappa z + \varkappa\lambda z^2 \qquad (3)$$

彈丸运动定律

$$ps = \varphi m \frac{dv}{dt}。 \qquad (4)$$

或

$$ps = \varphi m v \frac{dv}{dl}。 \qquad (5)$$

这些方程的总合使我們可以解主要的数学問題——求出 p—l 和 v—l 曲綫，以及 p—t 和 v—t 曲綫，特別是求出气体最大压

力 p_m 和彈丸的炮口速度 $v_д$。

我們首先采用两項式（$\varkappa>1$，$\lambda<0$，$\mu=0$）和上面举出的假設解決漸減性形状的火药的問題。

現在我們来按照各个射击时期依次进行解决問題。

1．前　　期

当建立这一时期的关系时，我們采用現象的最簡单方案，即彈带瞬时挤进膛綫。

主要假設：假如为了克服彈带挤进膛綫全部深度的阻力所需的力是 Π_0，而炮膛断面面积为 s， 则 $p_0=\frac{\Pi_0}{s}$，就称为挤进压力。我們認为当气体压力达到 p_0 的瞬間时，彈丸才开始运动。

在此瞬間前火药的燃燒是在定容积內进行，所以前期可以称为火药燃燒靜力学的时期，并且可以采用火药燃燒靜力学的各已知公式。

在这个时期內，除挤进压力 p_0 外，我們还要知道运动开始时装药已燃部分 ψ_0、火药相对厚度 $z_0=\frac{e_0}{e_1}$ 和火药的相对表面面积 $\frac{S_0}{S_1}=\sigma_0$。

表征着前期結束的这些量同时也是第一时期开始的量。

我們現在来推导出前期的主要公式。

点火药首先燃燒，并在药室中产生压力 $p_в$，$p_в$ 可按下式計算

$$p_в=\frac{f_в\omega_в}{W_0-\frac{\omega}{\delta}-\alpha_в\omega_в}。\qquad (6)$$

式中　W_0——药室容积；

$\frac{\omega}{\delta}$——基本装药的体积；

$f_в$、$\alpha_в$、$\omega_в$——点火药的火药力、余容和重量；在一般着火条件下 $\alpha_в\omega_в$ 可以忽略不計。

在压力p_B之下基本装药开始燃燒，并且在此瞬間的压力系根据計及点火药影响的火药燃燒静力学一般公式来确定。在弹带挤进膛綫的瞬間装药的某一部分ψ_0燃完，并且

$$p_0 = p_B + \frac{f\omega\psi_0}{W_0 - \frac{\omega}{\delta} - \frac{\omega}{\delta_1}\psi_0}。 \tag{7}$$

式中

$$\frac{1}{\delta_1} = \alpha - \frac{1}{\delta}。$$

因为挤进压力p_0为已知[1]，所以我們可由此确定在弹丸运动开始的瞬間装药已燃了若干部分。解方程（7）求ψ_0，得：

$$\psi_0 = \frac{(p_0 - p_B)\left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}\right)}{f + (p_0 - p_B)\left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right)} = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_0 - p_B} + \frac{1}{\delta_1}}。 \tag{8}$$

假如忽略点火药压力不計，因为p_0值常常是近似地已知，而p_B微小，则得出更加简单的計算公式：

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}} \tag{9}$$

量ψ_0主要决定于Δ，并且在一般情况下它在0.02到0.10之間变化。

知道了装药已燃部分ψ_0并有如下形式的火药燃燒定律时

$$\psi = \varkappa z(1 + \lambda z) = \varkappa z + \varkappa\lambda z^2,$$

可以确定在运动开始时已燃的火药相对厚度$z_0 = \frac{e_0}{e_1}$和相对表面面积σ_0。

按公式求出σ_0

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4\frac{\lambda}{\varkappa}\psi_0},$$

---

[1] 对炮弹而言，p_0是介于250—400公斤/公分^{2}之間；对整个导轉面挤入膛綫的枪弹而言，p_0約为300～500公斤/公分^2。

而z_0从方程$\sigma_0=1+2\lambda z_0$中求出

$$z_0=\frac{\sigma_0-1}{2\lambda}=\frac{(\sigma_0-1)(\sigma_0+1)}{2\lambda(\sigma_0+1)}=\frac{\sigma_0^2-1}{2\lambda(\sigma_0+1)}=\frac{2\psi_0}{(\sigma_0+1)\varkappa}。$$

因为通常$\sigma_0\approx 1$，所以

$$z_0\approx\frac{\psi_0}{\varkappa}。$$

除了这些特征量之外，还需要知道运动开始瞬間葯室自由容积的縮徑长$l_{\psi 0}$的値，此値以下列表达式之一确定之。

$$l_{\psi 0}=\frac{W_{\psi 0}}{s}=\frac{1}{s}\left(W_0-\frac{\omega}{\delta}-\frac{\omega\psi_0}{\delta_1}\right)=l_0\left(1-\frac{\Delta}{\delta}-\frac{\Delta}{\delta_1}\psi_0\right)=$$

$$=l_0\Delta\left(\frac{1}{\Delta}-\frac{1}{\delta}-\frac{\psi_0}{\delta_1}\right),$$

并且

$$l_0\Delta=\frac{W_0}{s}\ \frac{\omega}{W_0}=\frac{\omega}{s}。$$

2. 第 一 时 期

当推导第一时期的主要关系式时特拉仔德夫教授首先提出采用新的自变量$x=z-z_0$(彈丸运动开始时已燃的火葯相对厚度)。

在彈丸运动开始时$z=z_0$和$x=0$；火葯燃燒結束时$z_K=1$和$x_K=1-z_0$。

于是新宗标的变化范圍已預先知道。我們即以它的函数表示出所有四个主要的諸元：ψ、v、l和p。

1．$\psi=f_1(x)$的关系。把$z=z_0+x$的値代入公式$\psi=\varkappa z+\varkappa\lambda z^2$中，得：

$$\psi=\varkappa z_0+\varkappa\lambda z_0^2+\varkappa(1+2\lambda z_0)x+\varkappa\lambda x^2。$$

但是

$$\varkappa z_0+\varkappa\lambda z_0^2=\psi_0;\quad 1+2\lambda z_0=\sigma_0。$$

按特拉仔德夫的作法采用补充符号$\varkappa\sigma_0=k_1$得到所求的关系式：