

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.003

# 炮口初速预测方法综述

梁承栋<sup>1</sup>, 张贤椿<sup>2</sup>, 王 军<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学先进发射协同创新中心, 南京 210094)

**摘要:** 为提高火炮的射击精度, 对炮口初速预测方法进行研讨。根据火炮膛压的复杂特性, 结合理论推导, 提出影响火炮初速的主要因素及条件, 通过相关资料, 将现有的炮口初速预测分为经验公式法、解析函数法、物理对照法和数值分析法, 分别对其进行描述与分析, 总结出火炮在不同使用条件及发射弹序下的初速变化规律, 并对各类方法的适用范围以及技术发展趋势进行阐述。研究结果表明, 利用规律来提高预测精度将成为重要发展方向之一。

**关键词:** 炮口初速; 预测方法; 身管磨损量; 药室增长量; 测速雷达

**中图分类号:** TJ30 **文献标志码:** A

## A Summary of Prediction Methods of Muzzle Initial Velocity

Liang Chengdong<sup>1</sup>, Zhang Xianchun<sup>2</sup>, Wang Jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China; 2. Advanced Launch Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the firing accuracy of the artillery, the method of predicting the initial velocity of the muzzle is discussed. According to the complex characteristics of artillery pressure, combined with theoretical derivation, the main factors and conditions affecting the initial velocity of the artillery are proposed. According to the relevant data, the existing muzzle initial velocity prediction is divided into empirical formula method, analytical function method, physical contrast method and numerical analysis method. The paper describes and analyzes the initial velocity of the artillery under different conditions of use and launching sequence, and expounds the applicable scope and technical development trend of various methods. The research result shows that using the law to improve the prediction accuracy will become one of the important development directions.

**Keywords:** muzzle velocity; prediction method; barrel wear loss; artillery chamber growth; speed measurement radar

## 0 引言

随着当前作战要求的提高, 火炮需要通过首发命中或首群覆盖来消灭或重伤敌人, 射击精度已成为衡量火炮武器性能的重要指标<sup>[1]</sup>。所谓射击精度, 是指炮弹的实际弹着点与目标点的接近程度<sup>[2]</sup>。影响火炮射击精度的因素有很多, 例如炮口初速、气象条件、弹道模型以及定位定向精度等因素。其中弹丸的炮口初速是影响射击精度最重要的因素, 直接影响火炮的射程、密集度以及弹丸对目标的毁伤程度。根据瑞士康特拉夫斯公司提供的数据, 速度偏差 10%, 射击精度将偏差 64%<sup>[3]</sup>。炮口初速预测方法的研究, 对提高火炮的作战效能具有非常重要的实际意义<sup>[4]</sup>。

现有文献显示, 炮口初速预测方法研究始于 20 世纪 60 年代。在此之前对炮口初速的预测仅依靠经验公式手工计算炮口初速<sup>[5]</sup>。70 年代, 美国出现利用炮管磨损量测炮口初速的方法。国内在 20 世纪

末, 首次提出利用历史初速数据对炮口初速进行预测<sup>[6]</sup>。21 世纪初, 随着炮口测速雷达的普及<sup>[7]</sup>, 出现了利用实时弹丸初速数据预测下一发炮口初速的方法。

笔者围绕炮口初速预测的相关问题, 通过分析影响火炮初速的因素, 对现有文献炮口初速预测的相关方法进行描述和总结。

## 1 火炮初速的影响因素

火药在药室燃烧过程中产生的膛压是推动弹丸运动的根本原因<sup>[8-12]</sup>。根据膛压的复杂特性, 结合理论推导, 总结影响火炮初速主要因素有身管的内膛结构、装填以及射击条件<sup>[13]</sup>。

1) 内膛结构: 在长期使用过程中, 火炮会对身管内膛造成烧蚀磨损及形变, 通过影响膛压改变炮口初速。

2) 装填条件: 发射药的性能决定了膛压大小<sup>[14]</sup>, 装填不同的弹丸影响内弹道模型, 带来对初

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-21

基金项目: 陆军武器装备预研(30101040204)

作者简介: 梁承栋(1994—), 男, 浙江人, 硕士, 从事火力控制研究。E-mail: 740335932@qq.com。

速的影响。

3) 射击条件：指发射火炮时的环境温度，火炮是否为冷炮以及不同装药号的转换等射击条件也会影响火炮初速。

## 2 预测方法分类与介绍

笔者通过查阅国内外的相关文献，将现有的预测方法大致分为 4 类：第 1 类为手工计算火炮初速的经验公式法；第 2 类是利用身管磨损量的解析函数法，通过分析内弹道模型来建立身管磨损量与初速函数关系；由于解析函数法构建模型过于复杂，衍生出了第 3 类叫做物理量对照法的方法，以数值对照表的形式反映影响因素与初速偏差之间的关系；随着炮口测速雷达的普及，产生了第 4 类基于炮口初速历史数据预测下一发弹丸炮口初速的数值分析法，通过分析每组发射数据的内在联系来推测下一发初速。

### 2.1 经验公式法

经验公式法通过大量实弹经验，根据不同装填条件手工计算炮口初速：

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = \frac{3}{4} \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} - \frac{2}{5} \frac{\Delta m_0}{m_0} - \frac{1}{3} \frac{\Delta W_0}{W_0} - \frac{1}{3} \frac{\Delta e_0}{e_0} + 0.0011(\Delta t) - 0.04(\Delta H\%) \quad (1)$$

上式给出了装药量  $\omega$ 、药粒起始厚度  $e$ 、装药温度  $t$ 、装药的挥发物含量  $H\%$ 、弹丸质量  $m$  及药室容积  $W$  等因素的变化量对火炮初速  $v_0$  的影响关系<sup>[4]</sup>。

此方法是对火炮初速的粗略估计，没有严格的理论基础，对不同炮种和弹种的普适性不强。随着对炮口发射的深入研究，出现了更多精确的方法。

### 2.2 解析函数法

身管磨损是造成膛压降低以及火炮初速减退最主要的原因<sup>[15]</sup>。解析函数法主要通过分析火炮内弹道模型或者身管磨损规律，得到身管磨损量与火炮初速的定量关系。

#### 2.2.1 内弹道方程法

内弹道方程法通过分析火炮内弹道模型，以及弹丸在炮管内的热力学特性，从理论上计算身管磨损对火炮初速的定量关系。

田桂军<sup>[16]</sup>通过联立弹丸挤进方程以及内弹道方程(弹丸运动方程、形状函数、燃速方程和能量平衡方程)来构建身管磨损量与弹丸初速的关系。方程如下：

1) 挤进压力方程：

$$P = N'K \left( \frac{d_2}{d_0 + \Delta d} \right)^2 \frac{A}{B} \sigma_s \left[ \left( \frac{d_2}{d_0 + \Delta d} \right)^{2B} - 1 \right] \quad (2)$$

其中： $N'$  为动载修正系数； $K$  为弹道宽度修正系数； $d_2$  为弹带直径； $d_0$  为火炮膛径； $\Delta d$  为身管磨损量； $A$ 、 $B$  为结构参数， $A = [1/\cos(\alpha/2)] \cdot [1 + u/\tan(\alpha/2)]$ ， $B = A - 1$ 。

2) 弹丸运动方程。

$$v = \frac{dl}{dt}, \quad SP = \phi' m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

其中：前式为弹丸速度方程；后式为弹丸压力方程； $\phi'$  为阻力系数。

3) 形状函数：

$$\psi_i = \begin{cases} \chi_i z_i (1 + \lambda_i z_i + z_i^2) & z_0 < z_i < 1 \\ \chi_{si} \frac{z_i}{z_{ki}} (1 + \lambda_{si} \frac{z_i}{z_{ki}}) & 1 < z_i < z_{ki} \\ 1 & z = z_{ki} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $z$ 、 $\sigma$ 、 $\psi$  分别为相对燃烧厚度、相对燃烧表面积以及相对已燃烧体积。

4) 燃速方程：

$$\frac{dz_i}{dt} = \begin{cases} (u_{li}/e_i) p^{ni} & z < z_{ki} \\ 0 & z > z_{ki} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $p$  为压力； $u_{li}$  为特性参数。

5) 能量平衡方程：

$$Sp(l + l_\psi) = \sum_{i=1}^n f_i \omega_i \psi_i - \frac{\theta}{2} \phi' m v^2; \quad (6)$$

$$l_\psi = l_0 \left[ 1 - \Delta \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\omega \rho_{pt}} (1 - \psi_i) - \Delta \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\omega} \alpha_i \psi_i \right] \quad (7)$$

利用上述方程，结合测量的身管磨损量，采用龙格-库塔法可求解炮口初速。

傅建平等<sup>[17]</sup>在此基础上考虑了主装药和可燃药筒的区别，建立混合装药燃速方程组来代替式(5)：

$$\frac{dz_1}{dt} = \begin{cases} (u_1 p^v + k_v v)/e_1 & (z_1 < z_{k1}, p \leq 300 \text{ MPa}) \\ (u_{11} p + k_v v)/e_1 & (z_1 < z_{k1}, p > 300 \text{ MPa}) \\ 0 & (z_1 = z_{k1}) \end{cases}; \quad (8)$$

$$dz_2/dt = \begin{cases} p/I_k & (z_2 < z_{k2}) \\ 0 & (z_2 = z_{k2}) \end{cases} \quad (9)$$

#### 2.2.2 膛膛磨损规律法

膛膛磨损规律法认为身管不同部位磨损规律

不同, 结合这些规律来获取整个炮管磨损对初速的影响。

闵建平等<sup>[18]</sup>认为不同炮膛段的磨损程度对初速的影响不同。他将沿炮膛长度不同位置  $x$  及其对应的磨损量  $\omega(x)$  称为炮膛磨损规律, 表示为

$$\omega(x) = \omega_0 x^A v^B p^C \quad (10)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为与火炮种类有关的常数。利用测量仪测出该门火炮的炮膛磨损规律  $\omega-x$ , 再结合  $p-x$  与  $v-x$ , 通过式(10)联立下式:

$$\omega_i = w(x_i) = w_0(x_i^A v_i^B p_i^C), i = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 3 \quad (11)$$

将式(11)取对数后, 得到  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的值。

由于  $\omega-x$  曲线中不同部位的  $|\Delta v_0 / v_0| \%$  (初速减退量) 的贡献度不同, 故采用加权系数的方法计算每段磨损对初速的影响程度:

$$w_{ji} = \frac{(d\omega(x)/dx)_{ji} / (d\omega(x)/dx)_{\min}}{\sum_{i=1}^n (d\omega(x)/dx)_{ji} / (d\omega(x)/dx)_{\min}} \quad (12)$$

式中:  $(d\omega(x)/dx)_{ji}$  为第  $j$  条磨损曲线第  $i$  段变化率;  $(d\omega(x)/dx)_{\min}$  为第  $j$  条磨损曲线最小变化率。

得到同一条曲线上各段权系数后, 可以利用模拟的  $\omega-x$  曲线组求得实测磨损曲线  $(\omega-x)_s$  对应的  $|\Delta v_0 / v_0| \%$ , 即初速减退量。

刘怡昕等<sup>[19]</sup>在利用磨损规律基础上, 研究了不同装填条件对身管磨损的影响程度, 并通过发射药燃烧模型及能量平衡公式, 使计算获取的加权系数更为精确。该方法考虑的是整个炮膛磨损情况的影响, 可以减少因偶然因素产生的误差; 因此, 精度上更为可靠<sup>[20]</sup>。

### 2.3 物理量对照法

基于内弹道方程的解析函数法建模过程复杂, 需实测和计算的参数多, 很难获取准确的解析函数。物理量对照法不考虑火炮内在机理, 而是记录火炮发射过程中某些影响初速的物理量的变化, 例如药室增长或者炮膛径向磨损, 建立这些物理量与初速(初速偏差)的对应表, 通过查表或者插值的方式获取火炮初速。

根据选择物理量的不同, 可以作以下分类:

药室增长量法、身管磨损量法以及射弹量法。

#### 2.3.1 药室增长量-初速减退量对照法

药丸药室是放置发射药并保证发射药燃烧的空

间<sup>[21]</sup>。火炮长期使用会导致药室容积增加, 减少膛压, 进而导致火炮初速下降。可以根据药室增长程度来预测火炮初速。

20 世纪 70 年代之前, 俄罗斯军队中采用机械方式测量药室的增长程度, 并且记录对应的火炮初速值, 建立两者之间的数值关系表。如表 1 所示, 通过测量火炮药室增长量来计算初速减退量<sup>[20]</sup>。

表 1 54 式 122 mm 榴弹炮药室增长量对应的初速减退量

$\Delta l/\text{mm}$	5	15	25	35	45	55	65	75
$ \Delta v_0/v_0 /\%$	1	2	3	4	5	6	7	8

虽然药室增长法操作简便, 被广泛运用在部队中, 但仍然存在很多问题: 受各种随机因素影响较大, 不同类型和口径的火炮不能通用其对应表。并且相关研究<sup>[20]</sup>发现: 药室增长量并不能完全与初速减退量相联系, 反而炮膛的径向磨损对初速的影响更加直接。

#### 2.3.2 身管磨损量-初速减退量对照法

由于身管磨损量对于初速减退量的影响更为直接, 因此, 利用该物理量作为对照, 可以获得更精确的初速减退量。

美军<sup>[11]</sup>曾经采用定点检测法来获取身管磨损与火炮初速的对应关系, 即选取单门火炮中身管上的一个固定点, 记录这一点的磨损量以及整个火炮的初速减退量, 得到该火炮的固定点磨损量与初速度减退量的对应关系。通过这一对应关系进行全新火炮在整个使用寿命过程中的初速预测。由于每种火炮的规律不同, 需要对各种火炮都要进行发射实验, 耗弹量极大。另外研究单门火炮的磨损量可能受随机因素影响, 此方法存在较大的误差。

高乐南等<sup>[22]</sup>提出测量多门同类火炮不同时段的身管磨损量来减少偶然因素干扰。利用实验数据证明采用多门火炮得出的规律精确度更高。

孔国杰等<sup>[23]</sup>在考虑身管磨损量与初速减退量的关系时, 运用量子粒子群算法, 以 25 组实测的径向磨损量与初速减退量为训练集进行训练, 得出相应模型。依照模型可以通过身管磨损量计算出初速减退量, 结果如表 2 所示。

表 2 量子群算法预测结果

预测数据点	$x/\text{mm}$	$y/\%$	BP 神经网络预测		LS-SVM 预测	
			$\hat{y}/\%$	相对误差/ $\%$	$\hat{y}/\%$	相对误差/ $\%$
21	6.49	4.12	4.05	-1.70	3.98	-3.4
22	7.03	5.06	5.54	9.49	4.78	-5.5
23	7.70	5.80	6.31	8.79	5.92	2.0

### 2.3.3 射弹量-初速减退量对照法

在作战时测量身管磨损量极不方便，由于射弹量可以间接反映火炮身管磨损程度，通过建立射弹量与初速减退量的关系，可以避免测量上的不确定性。

最初的射弹量统计法认为初速与射弹量为线性关系，对 100 mm 坦克炮在身管报废标准的研究中，曾建立  $\Delta v=f(N)$  的数学模型：

$$v = v_0 - kN. \quad (13)$$

式中： $v_0$  为初始标定初速； $k$  为单发射弹量下降系数； $N$  为累计射弹发数。

俄罗斯地面炮兵部队运用的计算公式为：

$$v = v_{\max} - [n/N_{\max} \times (v_{\max} - v_{\min})]. \quad (14)$$

式中  $N_{\max}$  为火炮使用寿命中的最大射弹量。

随着数学分析方法的多样化发展，运用数值分析来计算炮口初速的方法越来越多。汪藻<sup>[24]</sup>用一元回归分析模型拟合发射炮弹数与初速减退量的关系，认为射弹数与初速减退量是折线模型。

金文奇等<sup>[25]</sup>在统计分析身管寿命退化特征量的基础上，建立基于正交回归设计思想以及偏最小二乘回归法的寿命推断技术。

王国辉等<sup>[26]</sup>建立了适用于坦克炮身管磨损量的灰色预测模型，得到发射弹药数和身管磨损量的关系，利用拉格朗日差值法计算当前射弹数下对应的弹丸初速值，结果如表 3 所示。

表 3 灰色预测方法下的实验结果

射弹发数	实际初速/ (m/s)	预测初速/ (m/s)	相对误差/ %
0	1 450.21	1 451.01	0.055
159	1 448.65	1 448.08	0.039
330	1 439.10	1 440.67	0.109
502	1 426.17	1 434.80	0.095

此类方法将火炮初速与射弹量直接挂钩。预测数据使用单门火炮整个使用寿命所获取的实验数据。从实际应用来看，由于每个身管的装填条件不同，存在一定误差，并不适用于所有火炮。

## 2.4 数值分析法

随着炮口测速雷达的普及<sup>[7]</sup>，出现了基于炮口雷达历史数据进行火炮初速预测的数值分析法。此类方法将火炮发射时测出的炮口初速数据反馈给火控软件，火控软件依据初速历史数据以及射击条件，利用相关算法预测下一发射弹的炮口初速<sup>[27]</sup>。

数值分析法根据预测方式可分为组预测和逐发预测。组预测以射击组平均初速为预测目标，不考

虑该射击组内部数据的跳动，仅考虑历史时段初速的序列波动，预测要求较高。逐发预测是边射击边预测组内下一发弹丸的初速，用实测初速随时校正即将发射弹丸的预测初速，因而效果好于组预测<sup>[28]</sup>。

### 2.4.1 组预测算法

组预测是以过往历史数据为基础，预测发射组的平均初速。需要选择历史数据中与发射组装填条件相近的组别作为参考数据，利用下式计算初速：

$$v = v_b + \Delta v_y + \Delta v_g + \Delta v_p + \Delta v_h. \quad (15)$$

式中： $v$  为预测组内初速； $v_b$  为标定初速； $\Delta v_y$ 、 $\Delta v_g$  和  $\Delta v_p$  分别为药温、弹重以及药批差引发的初速改变量； $v_h$  为初速减退量。

由装填条件(药温和弹重)引发的初速改变量可通过预测模型自行修正。初速减退量利用历史数据中射击条件相近的  $S$  组数据求得：

$$v_h = \left[ \left( \sum_{i=1}^s v_{gi} \right) \div s - W_{vh} - v_{b0} \right] \div v_{b0} \times 100. \quad (16)$$

式中： $v_{gi}$  为各组规范化初速； $W_{vh}$  为火药烧蚀补偿量； $v_{b0}$  为 0 号装药的标准初速。 $W_{vh}$  可用下式获得：

$$W_{vh} = (\text{efc}_2 - \text{efc}_1) \times W_{vs}. \quad (17)$$

式中： $\text{efc}_2$  为火炮已射 EFC 数(全装药当量)； $\text{efc}_1$  为  $s$  组平均规范化初速所对应的 EFC 数； $W_{vs}$  为火炮烧蚀对应的初速减退率。

### 2.4.2 逐发预测算法

进行逐发预测时需要每一发弹丸发射情况进行讨论，例如首发数据往往射击时火药气体做功的能量将用于加热膛壁，弹丸获得动能减少，初速降低，造成首发射程偏差<sup>[29]</sup>。发射第 2、3 发时并不能确保膛壁已经预热完毕，此时仍然与理论值有较大的偏差。后续发数虽然初速趋于理论值，但会上下波动，应当利用充分组内数据探求数据之间的关联。针对每一发的预测算法均不相同，可以根据发射弹序作如下归类：

#### 1) 首发初速预测。

为精确预测首发初速，彭志国等<sup>[30]</sup>建立了身管热散失的数学模型，通过理论推导，给出了热散失对弹丸初速的敏感系数理论表达式，从而推出首发弹丸初速：

$$\Delta v = \Delta Q / \rho m v_1. \quad (18)$$

上式表明了火炮膛壁热散失能量的大小与弹丸初速偏差的关系。

解维河等<sup>[31]</sup>认为首发弹丸初速可以近似等于之前射击时获取的每组首发初速的平均值。

$$v_{y/1} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 \cdots + v_n}{n} \quad (19)$$

2) 第 2、3 发初速预测：在预测第 2、3 发弹丸初速时，舒延春<sup>[32]</sup>提出通过分析历史的先验数据进行第 2、3 弹丸初速的预测：

$$v_{y/2} = v_1 + \Delta\omega \quad (20)$$

其中  $\Delta\omega$  为修正量，其值为历史组内数据中首发与第 2 发初速的平均差值。

关于第 3 发弹丸预测，笔者利用实测  $v_1$  与  $v_2$  的初速值，同时减少  $v_1$  的权重，可求得：

$$v_{y/3} = [(v_1 - v_2) / 2 + v_2 + v_2] / 2 \quad (21)$$

3) 后续发数初速预测：由于组内数据变多，后续的预测可以通过研究前几发的变化规律并结合历史数据对下发弹丸进行预测。根据对数据处理方式分成以下预测算法初速修正法，平均初速法以及灰色预测法。

① 初速修正法。

由于每组射击中装填以及射击条件不同，使用历史数据时会存在偏差。梁世超等<sup>[33]</sup>提出标准化概念：将各种装填及射击条件下的初速转化为标准条件下初速，建立初速修正模型，包括弹重修正、药温修正、药批修正。随后在通过测速雷达获取炮口初速数据条件下，把历史数据与实时测速数据修正相结合来得到炮口初速，计算公式如下：

$$v_y^g = \begin{cases} \sum_{i=1}^S (\bar{v}^g)_i / S = v'_m & J = 0 \\ v'_m + \bar{x}\sigma_G^2 / (\sigma_G^2 + \sigma_\Delta^2 / J) & 1 \leq J \leq K \\ \sum_{j=1}^J (\bar{v}^g)_j / J & J > K \end{cases} \quad (22)$$

其中： $J$  为预测组已射发数； $i$ 、 $j$  分别为历史数据组序以及预测组弹序。

李元生等<sup>[34]</sup>同样将预测初速偏差分为首发、药温、弹重与烧蚀偏差：

$$\Delta v_{OZ} = \Delta v_{os} + \Delta v_{oy} + \Delta v_{oq} + \Delta v_n \quad (23)$$

并且对于后续发数，有

$$v_{y/i+1} = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^3 v_{C/i-n} + \Delta v_{OZ} \quad (24)$$

② 平均初速法。

舒延春<sup>[32]</sup>提出不考虑历史射击的数据，而仅研究短时间内、射击条件无太大变化的效力射击时的

初速分布，采用  $N$  发初速累计平均预测值的方法：

$$v_{y/i+1} = \frac{1}{i} \sum v_i \quad (25)$$

罗兵等<sup>[4]</sup>采用滑动平均值预测的方法预测下发初速，在针对射击组数据多的情况，认为下发预测值由当前测量值与前 9 发平均值进行累加平均获得。并且针对数据中的异常数据进行处理，采用平均值代替该异常值。

③ 灰色预测法。

卢金柱等<sup>[35]</sup>提出可以利用灰色预测增强原始数据的规律性来预测火炮初速，即在当前射击组内，用前面 4 发的数据进行初速灰色预测建模求得下一发速度。董志勇等<sup>[36]</sup>对灰色预测方法进行灰预测精度分析，论证该方法的可信度以及精确度。

在以上 4 类方法中：经验公式法依靠装填条件得出火炮初速，计算简便但存在较大的误差，是一种临时计算初速的方法；解析函数法根据火炮发射机理建立初速计算模型，揭示了炮口初速偏差的形成内因，但建模及计算过程复杂，不适合推广使用；物理量对照法直接建立了烧蚀磨损量等物理量与初速偏差的数值关系，避免了复杂的建模过程，对照表使用简便，但在获取对照表数据时需要做火炮的全寿命使用实验，弹药和时间消耗较大，且同样存在难以精确测量磨损量的问题；数值分析法是在炮口测速雷达大量使用的情况下衍生出来的方法，利用炮口初速历史数据预测下一发初速，在历史数据多的情况下更容易掌握数据间的规律。

### 3 结论

笔者围绕炮口初速预测这一研究领域，对其影响因素、预测方法进行了归纳总结。研究表明：从炮口初速预测趋势来看，由于炮口初速雷达的大量使用以及武器装备信息化水平的显著提升，历史的炮口初速均能保存下来，利用历史大数据研究多门同型火炮在不同使用阶段、不同发射弹序下的初速变化规律，利用规律提高预测精度将成为重要发展发向之一。

### 参考文献：

[1] 杨春苗. 高寒山地边境反击作战炮兵群火力分配[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(6): 64-69.  
[2] 冯计才. 远程火炮武器系统精度分析理论研究及其算法实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
[3] 韩文涛. 火炮连续射弹初速及膛压测量研究[D]. 南京:

- 南京理工大学, 2008.
- [4] 罗兵, 邓荣. 初速对射击精度的影响及测速雷达在舰炮武器系统中的应用[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(2): 74-75, 118.
- [5] 郑津生. 155 mm 自行炮武器系统作战使用及指挥系统操作[M]. 北京: 国防大学出版社, 2001: 10-11.
- [6] 陈玉成. 自行榴炮初速修正问题探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 1997(3): 1-3, 18.
- [7] 胡江, 黄景德, 解维河. 基于测速雷达的舰炮初速测量技术研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(6): 94-96.
- [8] 崔军, 杜建革, 穆歌. 弹丸初速评定火炮身管寿命研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2003(S1): 134-137.
- [9] 孙强. 弹丸初速的测定方法[J]. 一重技术, 2002(Z1): 52-53.
- [10] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 15-17.
- [11] 张喜发, 卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 35-38.
- [12] 金志明, 袁亚雄, 宋明. 现代内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 20-24.
- [13] 贾海滨. 射弹初速对火炮射击精度的影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2006.
- [14] 闵建平, 孙德明, 谈应朝, 等. 发射药能量特性对初速偏差量的影响[J]. 火箭与制导学报, 2006(S2): 406-408.
- [15] 张国平, 王茂林, 杨东, 等. 某火炮身管寿命问题探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(3): 1-5.
- [16] 田桂军. 内膛烧蚀磨损及其对内弹道性能影响的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [17] 傅建平, 张培林, 李国章. 火炮身管寿命分析与计算[J]. 机械工程学院学报, 2000(3): 7-10.
- [18] 闵建平, 谭俊杰, 王桂玉. 由膛膛磨损规律确定火炮初速减退量的方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2002(2): 13-16.
- [19] 刘怡昕, 王桂玉. 由膛膛磨损规律确定火炮初速减退量[J]. 兵工学报, 2007(1): 7-9.
- [20] 刘瑞平. 确定火炮初速减退量新方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- [21] 刘佳. 弹丸药室容积测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [22] 高乐南, 刘顺利. 高炮初速及身管寿命预测试验研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 86-89.
- [23] 孔国杰, 张培林, 徐龙堂, 等. 一种新的火炮初速下降量预测模型[J]. 弹道学报, 2009, 21(3): 65-68.
- [24] 汪藻. 炮口初速建模初探[J]. 舰船科学技术, 1999(6): 25-30.
- [25] 金文奇, 冯三任, 徐达. 火炮身管寿命推断技术与工程实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 59-61.
- [26] 王国辉, 赵硕, 李向荣. 基于灰色系统理论的某坦克炮初速修正研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(3): 17-19, 29.
- [27] 章仁川, 赵国旗. 防空卫士—双 35 mm 高炮系统的性能及设计特点[J]. 现代雷达, 1996(1): 27-31.
- [28] 王秀玲, 赵刚. 基于炮口雷达的初速综合预测技术[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(7): 165-167.
- [29] 郑津生. 现代自行火炮射击与指挥研究[M]. 北京: 解放军出版社, 1999: 50-52.
- [30] 彭志国, 周彦煌, 陈桂东. 火炮身管热散失模型及其冷炮对弹丸初速的影响[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(2): 1-5.
- [31] 解维河, 朱涛. 中大口径舰炮使用测速雷达初速误差分离技术研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(1): 81-83.
- [32] 舒延春. 舰炮测速雷达的初速预测精度分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(3): 80-83.
- [33] 梁世超, 邱文坚. 自行榴炮的初速预测方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2000(4): 6-11.
- [34] 李元生, 陈礼国. 测速雷达使用新方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 123-126.
- [35] 卢金柱, 鲁小强. 火炮射击初速灰色预测方法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(11): 34-36.
- [36] 董志勇, 刘洋. 火炮初速灰色预测建模与精度分析[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(S1): 108-111.