

doi: 10.7690/bgzdh.2013.02.001

一种基于高炮射表数据的弹道反算方法

张贤椿

(中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007)

摘要: 针对射表或射表逼近函数难以直接计算弹道轨迹的问题, 提出了一种通过射表数据和射击诸元数据计算弹道轨迹的反算方法。该方法利用射表或射表逼近函数, 依据已经计算出的射击诸元, 反算该射击诸元对应的弹道轨迹。仿真结果证明了该方法的正确性和实用性, 该方法适用于各类火炮的弹道计算。

关键词: 射表; 射击诸元; 弹道轨迹数据; 反算

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

An Inverse Calculation Method of Calculating the Trajectory Data Based on Firing Table

Zhang Xianchun

(No. 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of calculating trajectory by using firing table or firing table fitting function, this paper puts forward an inverse calculation method of calculation trajectory by using firing table data and firing data. The method utilizes firing table or firing table fitting function, based on firing data known to inverse calculate trajectory. The result of the simulation justifies the validity and practicability of this method and this method is suitable for calculation trajectory of varied cannons.

Key words: firing table; firing data; trajectory data; inverse calculation

0 引言

在现有的高炮防空火控系统中, 利用射表或射表逼近函数进行射击诸元的解算因其快速性的特点, 依然是普遍采用的方法^[1]。由于射表及其逼近函数建立的是命中点与射击诸元的对应关系, 即通过命中点位置可直接查询或计算火炮的射击诸元, 从而避免了通过弹道微分方程计算弹道轨迹来求解射击诸元的繁复过程, 但若是想通过射表或射表逼近函数直接计算弹道轨迹则难以实现。然而, 新的军事应用往往需要火控系统提供弹道的轨迹数据, 如陆军指挥系统空域管理模块需要高炮弹道轨迹数据与其他空域使用单位的空域使用数据进行冲突检测^[2-3], 或使用弹道轨迹数据与数字地理信息系统进行遮蔽判断等, 这类军事应用往往不需要高精度的弹道轨迹数据, 但目前要计算弹道轨迹只能通过对弹道微分方程的积分才能实现, 对于不使用弹道微分方程的火控系统, 则难以计算出弹道轨迹数据, 目前也未见到通过射表(或射表逼近函数)计算弹道轨迹的相关文献; 基于此, 笔者利用射表或射表逼近函数, 依据已经计算出的射击诸元, 反算该射击诸元对应的弹道轨迹。

1 求解方法

1.1 求解原理

依据射表(或射表逼近函数)计算弹道轨迹的原理如下: 对于处在某一射击诸元(记为初始诸元)对应的弹道轨迹上的命中点, 其解算出的射击诸元的角度值(高低角、方位角)必定与初始诸元角度值相等; 而对不处于该弹道轨迹上的命中点, 其解算的射击诸元必与初始射击诸元的角度值不相等。

依据这一原理, 只要搜索到某一点 P_i , 如果其解算的射击诸元的角度值等于初始诸元的角度值, 则 P_i 即为轨迹上的点。基于射表的弹道轨迹计算原理图如图 1 所示。假定弹道起点为坐标原点 O , 命中点位置为 $M(x_m, y_m, h_m)$, xOy 为坐标的水平面, 且 y 轴为直线 OM 在水平面的投影, h 轴表示高度。令弹道轨迹由 L_b 表示, 其在 yOh 面上的投影即为曲线 L_p , 可知曲线 L_p 为忽略方位角修正(横风和偏流的影响)前提下的“弹道轨迹”, 记 α_0 为曲线 L_p 的高低角, β_0 为点 M 的射击方位角。由于图 1 中坐标的定义与该弹道的纵风、横风的风向相吻合, 故

收稿日期: 2012-08-19; 修回日期: 2012-09-20

作者简介: 张贤椿(1976—), 男, 江西人, 博士, 从事炮兵指挥控制及火力控制研究。

笔者求解弹道轨迹计算过程是：先依据高低角相等的原则在 yOh 面上搜索计算出曲线 L_p ，再对 L_p 的各点进行方位角修正，得到弹道轨迹 L_D 。

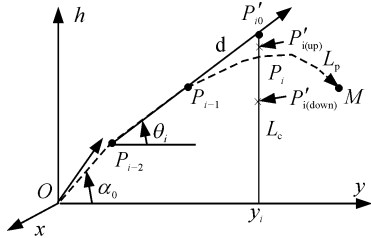


图 1 弹道轨迹计算原理

1.2 弹道轨迹投影曲线 L_p 的计算

不失一般性，如图 1 所示，假定已知曲线 L_p 上的 2 个轨迹点 $P_{i-2}(x_{i-2}, y_{i-2}, h_{i-2})$ 和 $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, h_{i-1})$ ，要计算下一个 L_p 上的轨迹点 $P_i(x_i, y_i, h_i)$ 的坐标，由于 P_{i-2} 、 P_{i-1} 和 P_i 都在 yOh 平面上，其 x 轴向坐标均为零，下面给出求取点 P_i 坐标的方法。

首先求取以 P_{i-2} 为起点经过点 P_{i-1} 外推等步长 d 的点 P'_{i0} ，其坐标如下

$$\begin{cases} x_i = 0 \\ y_i = y_{i-1} + d \cdot \cos(\theta_i) \\ h_i = h_{i-1} + d \cdot \sin(\theta_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $i \geq 0$ ，其中 $y_0 = x_0 = 0$ ，且

$$\begin{cases} \theta_i = \arctan\left(\frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{x_{i-1} - x_{i-2}}\right), & (i > 1) \\ \theta_i = \alpha_0, & (i = 1) \end{cases} \quad (2)$$

由于曲线 L_p 为上凸曲线，故点 P'_{i0} 必定处在曲线上方，沿 P'_{i0} 向下做以垂线 L_c ，垂线 L_c 必与曲线 L_p 存在交点 P_i (如图 1 所示)，即以点 P_i 为命中点解算的诸元中高低角应等于 α_0 ，下面给出计算 P_i 坐标的方法。令 $f_\alpha(d, h)$ 为射表中高低角的射表处理函数，它是基本射表和修正射表在高低角上的叠加，即可以是射表插值函数也可以是射表逼近函数，则垂线 L_c 上搜索的某一点 $P'_j(x_j, y_j, h_j)$ 在曲线 L_p 上应满足

$$f_\alpha(\sqrt{x_j^2 + y_j^2}, h_j) = f_\alpha(y_j, h_j) = \alpha_0 \quad (3)$$

式 (3) 可写成如下形式：

$$f_\alpha(y_j, h_j) - \alpha_0 = 0 \quad (4)$$

由于 L_c 为位置已知的垂线，显然 $y_j = y_i = y_{i-1} + d \cdot \cos(\theta_i)$ 已知，故式 (4) 仅 h_j 为未知数，记

$$F_\alpha(h_j) = f_\alpha(y_j, h_j) - \alpha_0 \quad (5)$$

则在 L_c 上搜索点 P_i 的问题可转化为求解 $F_\alpha(h_j) = 0$ 的问题，解出 h_j 即得到点 P_i 的坐标。由于 $F_\alpha(h_j)$ 对 h_j 是较复杂的非线性函数，笔者采用二分法对点 P_i 进行夹逼搜索，如图 1 中点 $P'_{i(up)}(x'_{i(up)}, y'_{i(up)}, h'_{i(up)})$ 和 $P'_{i(down)}(x'_{i(down)}, y'_{i(down)}, h'_{i(down)})$ 分别为垂线 L_c 上位于点 P_i 上下的 2 个点，其中间点记为 $P'_{i(mid)}(x'_{i(mid)}, y'_{i(mid)}, h'_{i(mid)})$ ，由于 L_c 上的点 x 和 y 轴坐标均相等，只需要搜索其高度值，搜索方法如下：

$$\begin{cases} h'_{i(up)} = h'_{i(mid)}, & F_\alpha(h'_{i(mid)}) > 0 \\ h'_{i(down)} = h'_{i(mid)}, & F_\alpha(h'_{i(mid)}) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

搜索终止条件为：

$$|F_\alpha(h'_{i(mid)})| < E_\alpha \quad (7)$$

其中 E_α 为给定的高低角计算容许误差。若满足式 (7)，则认定 $h'_{i(mid)}$ 为点 P_i 的高度，进而确定曲线 L_p 上点 P_i 的坐标。

1.3 弹道轨迹曲线 L_D 的计算

弹道横向修正的原理图如下图 2 所示。

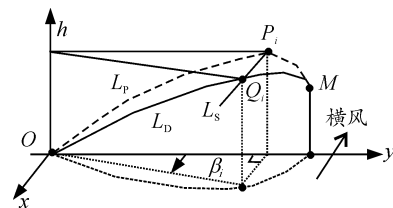


图 2 弹道的横向修正

点 P_i 是已求出的弹道投影曲线 L_p 上的点，它是弹道曲线 L_D 上点 $Q_i(x_{Qi}, y_{Qi}, h_{Qi})$ 的投影，由于笔者定义的坐标和弹道的纵风、横风方向定义一致，如图 2 所示，显然通过点 P_i 和点 Q_i 的直线 L_s 平行于 x 轴，现在需要在直线 L_s 上搜索满足其方位角修正量等于 β_0 的点 Q_i 。假定方位角修正函数为 $f_\beta(d, h)$ ，

它是横风修正与偏流修正的叠加，则点 Q_i 应满足

$$f_{\beta}(\sqrt{x_{Q_i}^2 + y_{Q_i}^2}, h_{Q_i}) = \beta_0 \tag{8}$$

由于 $y_{Q_i} = y_i$ 、 $h_{Q_i} = h_i$ ，上述可简化为

$$f_{\beta}(\sqrt{x_{Q_i}^2 + y_{Q_i}^2}, h_{Q_i}) - \beta_0 = f'_{\beta}(x_{Q_i}) - \beta_0 = 0 \tag{9}$$

记

$$F_{\beta}(x_{Q_i}) = f'_{\beta}(x_{Q_i}) - \beta_0 \tag{10}$$

同上，笔者采用二分法搜索 $F_{\beta}(x_{Q_i}) = 0$ 的解，具体搜索方法和上式 (6) 基本一致，此处不再单独给出。通过以上方法即可得到 Q_i 的坐标值，逐点重复外推即可确定该射击诸元对应的弹道轨迹 L_D 。由于笔者定义的坐标体系可能与火控系统实际的坐标体系定义不一致，要得到实际坐标系的弹道轨迹，需要将弹道轨迹 L_D 的坐标数据从文中的坐标系转换到实际的坐标系上，由于该转换方法比较成熟^[4]，笔者不再赘述。

以上就是通过射表或射表逼近函数，在射击诸元已经求解出来的前提下计算弹道轨迹的方法，与通过弹道微分方程先计算出弹道轨迹再解算射击诸元的顺序不同，笔者所述方法先解算射击诸元再计算弹道轨迹，是为弹道轨迹的反算方法。

2 实例仿真

以某一高炮为例，假定气象条件和弹道条件均为标准条件，对一坐标为 $M(0, 4\ 500.0, 940.0)$ 的命中点求取其弹道轨迹。先解算出命中点 M 对应的射击诸元中高低角为 242.06 mil，方位角为 0.172 mil，取外推步长 $d=50$ m，通过笔者给出的方法计算的部分弹道轨迹数据如表 1，对应的弹道轨迹如图 3。

表 1 弹道轨迹数据

序号	x/m	y/m	h/m
0	0	0	0
1	0.011	48.40	12.51
2	0.022	96.75	25.30
...
91	0.012	4 446.19	936.61
92	0.000	4 500.00	940.00

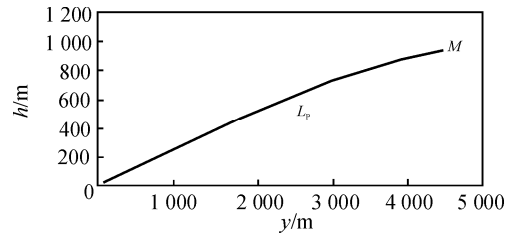


图 3 弹道轨迹平面

由于 x 轴上的坐标值很小，故在图 3 中取消 x 轴， L_p 即为对应的弹道轨迹投影。

由本例可知，通过射表计算弹道轨迹的方法是先计算射击诸元再计算弹道轨迹，计算过程并不占用射击诸元的时间，计算过程可以依据实际需要的计算时间、精度和轨迹密度要求，对算法的容许误差和外推距离 d 进行相应的调整，通过本实例仿真结果，可验证本方法的正确性和实用性。

3 结论

笔者针对高炮火控系统普遍使用射表(或其逼近函数)进行火控解算的情况，提出了依据射表和事先计算的射击诸元计算弹道轨迹的思路，并给出了具体的弹道轨迹搜索方法。该方法虽然并非唯一或最优，但是只要按照笔者给出的求解原理，可自行选择更适合实际要求的搜索方法来计算弹道轨迹。实例仿真说明了该方法的正确性和实用性。同时，只要射表数据完整，该方法同样适用于各类火炮的弹道计算。

参考文献：

[1] 何友, 闫红星. 火炮射表数据处理方法评述[J]. 火力与指挥控制, 1993, 19(3): 45-50.

[2] 石潇竹. 我国低空空域调整与划设探讨[J]. 指挥信息系统与技术, 2010, 1(3): 23-26.

[3] 孙晓鸣. 陆战场空域综合管理[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(3): 62-65.

[4] 郭治. 现代火控理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.