

doi: 10.7690/bgzd.2016.11.007

## 弹丸飞行时间与射击诸元关系分析

孟 灿, 毛 征, 孟 博, 刘松松

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 为提高火控计算机弹道计算精确度, 减小射击误差, 提出一种射击诸元与弹丸飞行时间  $t_f$  关系的算法分析。通过射击诸元与  $t_f$  的灵敏度解析表达式, 分析了  $t_f$  计算精度在不同航路段对射击诸元影响的大小。利用 3 条航路进行灵敏度曲线仿真, 在不同目标速度下, 定量分析了弹丸飞行时间对射击诸元即火炮高低、方位角的影响。仿真结果表明: 在航路捷径附近, 对 1 000 m 距离上的目标射击误差方位为 0.5 m、高低向 0.1 m; 因此, 要减小射击误差, 关键之一是提高弹丸飞行时间的计算精度。

**关键词:** 弹丸飞行时间; 射击诸元; 灵敏度

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Analysis on Relation of Projectile Flight Time and Firing Data

Meng Can, Mao Zheng, Meng Bo, Liu Songsong

(College of Electronic Information &amp; Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of fire control computer ballistic calculation and reduce shooting errors, this paper proposes an algorithm to analysis the relationship between firing data projectile and bullet flight time  $t_f$ . The sensitivity analytical expression about shooting coordinate and  $t_f$  analyzes the impacts to shooting coordinate in different  $t_f$  accuracy and different route parameters. By three flying routes with the different target speeds to analyze quantitatively and simulate the sensitivity curves about how  $t_f$  influences the firing coordinate, namely azimuth and elevation angles. Simulation results show that, in the vicinity of a shortcut route, target shooting azimuth error is 0.5 m, elevation to 0.1 m, when the target distance is more than 1 000 m. Therefore, to reduce the errors of shooting, one of the keys point is to improve the accuracy of the projectile flight time.

**Keywords:** projectile time of flight; firing data; sensitivity

### 0 引言

随着电子信息技术的迅猛发展及其在军事领域中的广泛应用, 新的军事技术革命正在形成, 对武器精度提出了越来越高的要求。在高炮火控系统中, 常用查射表方法得到简单实用的弹道模型, 进而求取射击诸元。求取射击诸元时, 通常是通过求取弹丸飞行时间后再求火炮的高低角和方位角, 其他因素引起的修正也最终反映到弹丸飞行时间上<sup>[1]</sup>; 因此, 弹丸飞行时间对射击诸元精度影响很大。

### 1 研究目的

在现代战争中, 武器装备的快速反应能力变得非常重要, 及时精确打击是提高导弹作战反应能力和射前生存能力的关键, 因而解决射击诸元的准确计算问题显得至关重要。只有精确计算出射击诸元, 才能使弹炮在射前迅速、准确地完成诸元装订, 有效缩短发射准备时间, 从而把握战机, 成功实现“打得到、打得准”的射击效果<sup>[2]</sup>。而弹丸飞行时间对射击诸元的准确计算有非常大的影响, 笔者以水平

匀速直线飞行目标为模型, 从仿真过程中获得数据, 观测弹丸飞行时间与射击诸元的相对关系, 即  $A_{qTc}$ 、 $E_{qTc}$  (弹丸未来点方位角, 高低角) 变化对  $t_f$  的灵敏度, 使得射击诸元计算精确分析更加定量化。为系统精度分析提供支撑点<sup>[3]</sup>。

### 2 射表介绍

射表是对于特定的弹、炮、药, 在实际条件下通过反复试验、测试和验证获得的, 含有所需射击诸元的数字表或图表。高炮射表一般以 2 个量为自变量进行编制。射表的内容通常包括基本诸元、修正诸元、散布诸元、辅助诸元和射表说明等。

基本射表给出了在标准条件下, 命中点与基本诸元的关系, 是射表的基本部分。基本诸元是在标准条件下计算得到的射击诸元, 包括抬高角、偏流角、飞行时间、弹头存速、弹头存角等; 修正诸元包括弹丸质量偏差、初速偏差、气温偏差、气压偏差、风速等规定偏差量对射击诸元的修正量。

散布诸元列出了各种射击条件下的散布特征

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-08-29

作者简介: 孟 灿(1990—), 女, 河北人, 硕士, 从事电子与通信工程研究。

量，即距离、方向和高低概率误差。对于时间引信，有时还列出飞行时间概率误差。散布诸元主要供射击指挥、准备弹药数量及选取射击方法时参考。文中所使用射表以水平距离和高度为自变量，只包含基本诸元<sup>[4]</sup>。

### 3 算法分析

射击诸元计算要解决的问题是在给定发射点和目标点地理位置的情况下迅速寻找这 2 点的弹道。例如高炮射击指挥仪通常由光学坐标测定器、跟踪系统、解算仪、同步传送系统等组成。指挥仪得到空情通报时，由光学坐标测定器搜索、瞄准目标或以同步传送系统引入炮瞄雷达的目标信息，同时由跟踪系统进行跟踪，并不断地将测定的目标现在点坐标值传给解算仪。解算仪根据目标现在点坐标，按照预定的目标运动假定，用坐标求取的目标运动参数、弹道函数以及弹道和气象条件变化引起的弹道偏差等，连续地解算出火炮射击诸元(即目标与弹丸未来相遇点的方位角、射角)，同步传送系统将射击诸元传送给火炮，指挥火炮射击<sup>[5]</sup>。

#### 3.1 弹道解算坐标系

火控未来点射击诸元解算是火控仿真系统要完成的关键工作，是以光电跟踪计算机输出目标的角度值  $A$ 、 $E$  和目标距离之  $D$  为输入量，但是这些量均为球坐标系下的坐标值，需要转换到水平直角坐标系之后通过查射表及插值计算求出各射击诸元，再经过极坐标转换，最后解出未来点的方位角和高低角<sup>[6]</sup>。直角坐标系一般用在未来点解算、滤波、坐标系转换等方面，极坐标一般用在跟踪系统、火炮随动系统的驱动量和探测装置的输出量。所以，在火控系统中经常需要在直角坐标和极坐标之间转换<sup>[7]</sup>。直角坐标系与球坐标系如图 1 所示，其中各点含义如下。

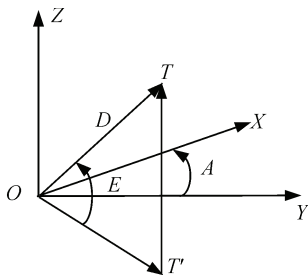


图 1 坐标系

其中： $O$  为探测器位置； $X$  为水平距离在指南方向； $Y$  为水平距离在指东方向； $Z$  为目标高度； $A$  为探测

器方位角； $E$  为探测器高低角； $D$  为探测器对目标的测量距离； $T$  为目标点。

因此，两者之间需要进行转换，其转换关系为

$$\begin{cases} X \\ Y \\ Z \end{cases} = \begin{cases} D \cos A \cos E \\ D \sin A \cos E \\ D \sin E \end{cases} \quad (1)$$

其中  $D, A, E$  的值如下式所示：

$$\left. \begin{cases} D = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ A = \arctan \frac{Y}{X} \\ E = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \end{cases} \right\} \quad (2)$$

#### 3.2 目标未来点解算

假定目标以匀速直线航路飞行<sup>[8]</sup>。在此假定下弹丸飞行轨迹如图 2 所示。在图中，未来点是利用射表插值计算弹丸飞行时间  $t_f$ ，并根据目标航路假定条件求出命中点坐标。

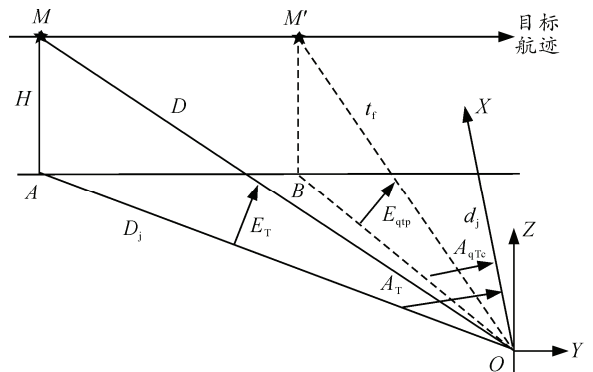


图 2 弹丸运行轨迹

当弹丸飞行到未来点时，即此时目标已飞行到  $M'$  点。 $O$  是火炮回转中心，即射击原点； $A$  为现在点在水平面上投影； $B$  为未来点在水平面上投影； $d_j$  为航捷点在水平面上投影； $(E_T, A_T)$  为目标现在点的高低、方位角； $(E_{qTc}, A_{qTc})$  为目标未来点的高低、方位角<sup>[9]</sup>。

由弹丸运行轨迹可得出射击诸元直角坐标计算如下式：

$$\left. \begin{cases} X_{Hqc}(k) = X_H(k) + v_{HX} \cdot t_f(k) \\ Y_{Hqc}(k) = Y_H(k) + v_{HY} \cdot t_f(k) \\ Z_{Hqc}(k) = Z_H(k) + v_{HZ} \cdot t_f(k) \end{cases} \right\} \quad (3)$$

式中： $k$  为工作周期(文中为  $0.02 \text{ s}$ )； $(X_H, Y_H, Z_H)$  为目标现在水平直角坐标； $(X_{Hqc}, Y_{Hqc}, Z_{Hqc})$  为目标未来水平直角坐标； $v_{HX}$ 、 $v_{HY}$  和  $v_{HZ}$  分别为目标在  $(X,$

Y, Z)方向的飞行速度。

目标做匀速直线运动，其未来点的弹丸飞行时间  $t_f$  由下式确定：

$$t_f(k) \propto f(D_{qc}, H_{qc}) \quad (4)$$

式中： $f(D_{qc}, H_{qc})$ 为表格函数； $D_{qc}$ 为火炮回转中心与目标未来点直线距离； $H_{qc}$ 为未来点高度。匀速直线运动中弹丸飞行时间  $t_f$  与  $D_{qc}$  及  $H_{qc}$  成比例。表格函数  $f(D_{qc}, H_{qc})$ 以距离和高度作为输入，利用射表与插值法求解出弹丸飞行时间  $t_f^{[10]}$ 。通过式(5)和式(6)可求得火炮射击诸元( $A_{qTc}, E_{qTc}$ ):

$$\tan A_{qTc} = \frac{Y_{Hqc}}{X_{Hqc}}; \quad (5)$$

$$\tan E_{qTc} = \frac{Z_{Hqc}}{\sqrt{X_{Hqc}^2 + Y_{Hqc}^2}} \quad (6)$$

### 3.3 射击诸元( $A_{qTc}, E_{qTc}$ )对 $t_f$ 灵敏度

通过式(5)，求  $A_{qTc}$  对  $t_f$  导数即可得出射击诸元方位角对于弹丸飞行时间的灵敏度公式：

$$\lambda_A(k) = \frac{dA_{qTc}}{dt_f}, \quad \lambda_E(k) = \frac{dE_{qTc}}{dt_f} \quad (7)$$

为分析方便起见，又不失一般性，笔者假定目标仅沿 Y 轴运动，且为等高、匀速直线飞行，如图 2 所示。则  $v_{HX}=v_{HZ}=0, X_{Hqc}=X_H, Z_{Hqc}=Z_H$ 。所以有：

$$\lambda_A(k) = \frac{dA_{qTc}}{dt_f} = \frac{v_{HY} X_H}{X_H^2 + (v_{HY} \cdot t_f)^2}; \quad (8)$$

$$\lambda_E(k) = \frac{dE_{qTc}}{dt_f} = \frac{(\tan E_{qTc})^3 v_{HY} (Y_H + v_{HY} \cdot t_f)}{1 + (\tan E_{qTc})^2 Z_H^2} \quad (9)$$

式中  $v_{HY}$  为目标在 Y 方向的飞行速度<sup>[11]</sup>。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 不同航路条件下的 $t_f$

设定航路参数为：航速、航高、航捷、斜距( $v, H, d_j$ )。选取 3 条目标航路，其参数分别为：

(250 m/s, 1 000 m, 500 m);

(350 m/s, 1 000 m, 500 m);

(450 m/s, 1 000 m, 500 m)。

其弹丸飞行时间分别如图 3~图 5 所示。

### 4.2 射击诸元方位角 $A_{qTc}$ 对 $t_f$ 曲线

不同航路条件下的  $A_{qTc}$  对  $t_f$  求导函数  $\lambda_A$  曲线分别如图 6~图 8 所示，其变化关系与  $A_{qTc}$  速度曲线相似。目标速度越高， $t_f$  对  $A_{qTc}$  的影响也越大。

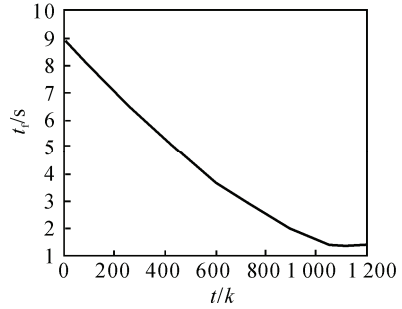


图 3 第 1 条航路的  $t_f$

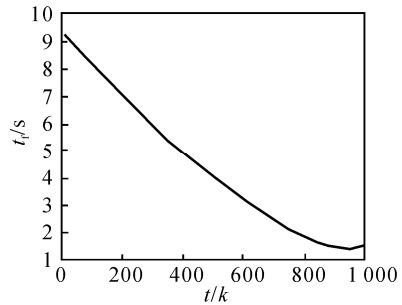


图 4 第 2 条航路的  $t_f$

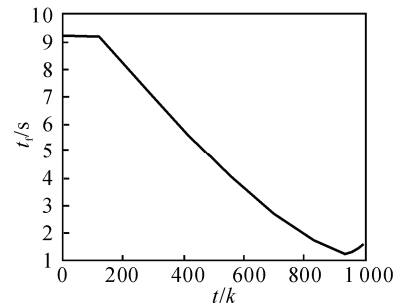


图 5 第 3 条航路的  $t_f$

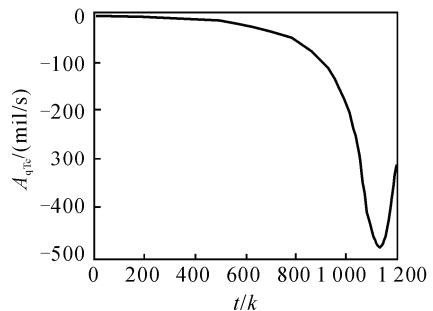


图 6 第 1 条航路  $\lambda_A$

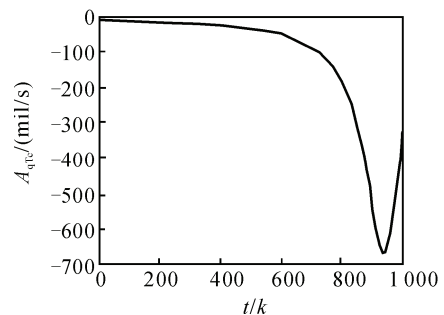
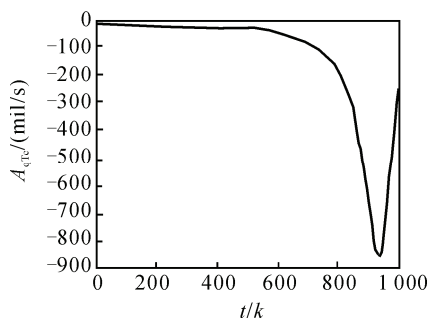


图 7 第 2 条航路  $\lambda_A$

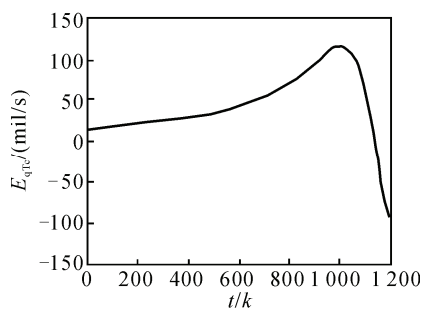
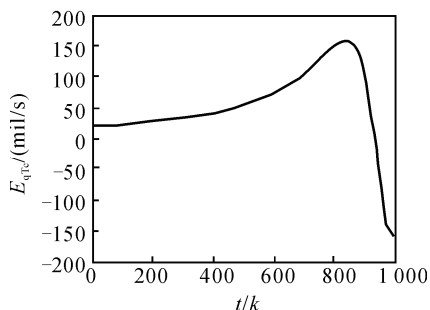
图 8 第 3 条航路  $\lambda_A$ 

由图 6 中可以看出：在航路捷径前， $A_{qTc}$  的变化接近 500 mil/s，也就是 0.5 mil/ms，即当由  $t_f$  计算所导致的 1 ms 误差时，就可能带来  $A_{qTc}$  有 0.5 mil 的计算误差。而这 0.5 mil 的计算误差在 1 000 m 距离上方位方向可偏离目标约 0.5 m。所以在航路捷径附近，较大的  $t_f$  计算误差就会导致较大的  $A_{qTc}$  计算误差。

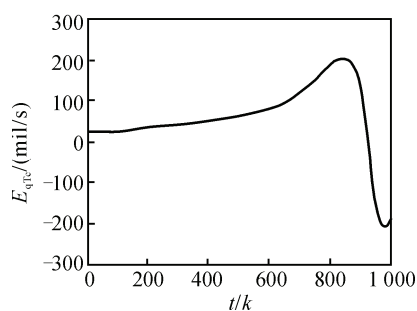
当目标速度越快， $\lambda_A$  在航路捷径附近也越大，如图 7、图 8<sup>[12]</sup>所示。

#### 4.3 射击诸元高低角 $E_{qTc}$ 对 $t_f$ 灵敏度曲线

不同航路条件下的  $E_{qTc}$  对  $t_f$  求导函数  $\lambda_E$  曲线分别如图 9~图 11 所示。可以看出： $\lambda_E$  在航路捷径前变化较快，变化趋势与  $E_{qTc}$  速度曲线类似。目标速度越高， $t_f$  对  $A_{qTc}$  的影响也越大<sup>[13]</sup>。

图 9 第 1 条航路  $\lambda_E$ 图 10 第 2 条航路  $\lambda_E$ 

如图 9 所示，在航路捷径前， $\lambda_E$  可达大于 100 mil/s，也就是说大于 0.1 mil/ms。由此可导致在 1 000 m 距离上，高低向计算误差约 0.1 m。

图 11 第 3 条航路  $\lambda_E$ 

## 5 结论

高炮依据其作战方式、发射弹种和打击目标的不同，对精度的要求也不一样。根据文中计算方法及数据曲线的分析得知，弹丸飞行时间  $t_f$  对射击诸元的高低角、方位角的计算精确度有很大影响<sup>[14]</sup>。所以，在实际过程中对弹丸飞行时间计算的精度要求较高，否则会带来较大的射击误差，尤其是在航路捷径附近。

## 参考文献：

- [1] 李国亭, 邹珊刚, 杨俊杰, 等. 高技术武器装备在现代战争中的重要作用[J]. 科技进步与对策, 2001, 18(1): 1-40.
- [2] 王国平, 芮筱亭, 王广伟. 射击精度评估新技术[J]. 现代防御技术, 2008, 36(4): 1-4.
- [3] 应浩, 黄克平. 开放式 T 靶弹丸斜入射风矢量修正模型[J]. 兵工自动化, 2015, 34(7): 12-14.
- [4] 程开甲, 李元正. 射表编拟技术[M]. 北京: 国防出版社, 2002: 3-6.
- [5] 潘红华, 胡家升, 杨绍清. 解弹道方程求解舰炮武器系统射击诸元的数学模型[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 23-26.
- [6] 吕春花. 分布式近程反导武器火控系统仿真技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 24-25.
- [7] 王涛, 郑垣模, 高乐南. 高炮瞄准具解算射击诸元分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2): 46-49.
- [8] 梁文凯, 周克栋, 李践飞. 身管与弹丸的熔融磨损模型与研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 10-14.
- [9] 张卡, 张道俊, 盛业华, 等. 三维坐标转换的两种方法及其比较研究[J]. 数学的实践与认知, 2008, 38(23): 1-5.
- [10] 王涛, 唐宴虎. 高炮射弹飞行时间拟合[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(2): 88-90.
- [11] 付小锋, 梁先洪, 张桂花, 等. 弹丸飞行时间拟合误差对射击诸元误差的影响[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(7): 13-15.
- [12] 张志涌. MATLAB 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [13] 宋凯, 夏晨秋, 张承伟. 弹丸落点被动声定位方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 1-4.
- [14] 刘顺利, 王玉生, 王巨海, 等. 防空兵射击理论与射击指挥[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.