

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.02.023

高炮最佳开火时机辅助决策分析

李文才, 唐恭富

(中国兵器工业第 58 研究所 军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高高炮射击的命中概率, 提出高炮最佳开火时机的辅助决策方法。根据高炮对空中运动目标射击的特点, 分析了决定高炮最佳开火时机的各因素, 用开火决心因子作为辅助决策依据, 并给出具体方法和流程, 以 57 高炮和某多管 25 高炮进行了实例仿真分析, 结果表明与实际情况相符。

关键词: 开火时机; 密集度; 决心因子

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

Assistant Decision Analysis of Optimal Fire Time of Antiaircraft Artillery

Li Wencai, Tang Gongfu

Dept. of Armament Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China

Abstract: In order to improve the shooting probability of antiaircraft artillery, put forward the assistant decision method for optimal fire time. According to antiaircraft artillery shooting features to air mobile target, analyze factors which decide optimal fire time of antiaircraft artillery. Use firing decision parameter as assistant decision reason, and put forward methods and process. Take 57 antiaircraft artillery and certain type multi-barrels 25 antiaircraft artillery as example, carry out example simulation analysis. The analysis result indicates that the method is accord with fact

Keywords: fire time; density; decision parameter

0 引言

对于超低空超高速目标, 防空高炮可射击时间短, 在一个长点射时间内, 目标就已从临近到远离。而对速度较低的有人驾驶飞行器, 如盲目开火, 不但不能“一击既中”, 而且会暴露位置, 危及自身安全, 同时, 目标发现有火力攻击时将进行有意规避机动, 使射击的命中概率下降。因此, 笔者对高炮最佳开火时机辅助决策方法进行探讨, 以引导射击操作, 以果断、及时的火力取得预期的作战效果。

1 高炮对空中运动目标射击的特点

1) 必须向提前位置射击

由于目标是运动的, 必须瞄准目标运动方向上未来某点射击, 在该点射弹和目标相遇, 该点称为提前点或命中点。

2) 必须连续不断地测定目标现在点位置

因为目标不断运动, 必须快速、连续不断地测量目标位置, 并识别其运动参数。

3) 必须连续不断地确定目标提前位置

由于位置不断改变, 与之对应的提前位置以及射击诸元也随之改变。因此, 必须连续不断地确定提前点与射击诸元。

4) 每次射击都是射击诸元准确的效力射

高炮对运动目标作战, 特别是有效射程近的小口径高炮打击速度达几马赫的巡航导弹类小目标,

因目标体积小, 要求射击诸元与火炮跟踪瞄准有足够高的精度才能命中目标, 而因目标速度快, 高炮可射击时间短, 难以实施射击校正。只有准确、迅速、连续地求出提前位置与射击诸元, 才能保证火炮能准确跟踪瞄准, 并在短暂的可射击时间内, 以及时、猛烈的火力来歼毁目标。

2 主要决策依据分析

从高炮对空中运动目标射击特点可以看出, 射击诸元与火炮的跟踪瞄准要有足够高的精度, 才能确保较高的命中概率。因此, 除有效射程外, 决定高炮最佳开火时机的主要因素有射击诸元误差、火炮跟踪瞄准误差和火力密集度, 此外还需保证弹丸与目标间有足够的相对存速。

2.1 射击诸元误差

随着高炮火力指挥与控制系统技术的发展, 对空中目标位置的跟踪测量精度很高, 此时射击诸元误差的主要来源为数学模型引起的误差, 包括弹丸外弹道函数(或逼近的多项式)、目标运动参数以及在提前时间(自射弹出炮口时刻起到目标与射弹相遇的时间)内目标的运动规律假定等。外弹道和目标运动参数误差在射击解算过程中不能在线获得, 而是通过优化外弹道函数和目标位置滤波模型, 使其误差能控制在可接受的范围内, 因此, 这两项引起的误差将不作为最佳开火时机决策依据。

收稿日期: 2010-11-19; 修回日期: 2011-01-28

作者简介: 李文才(1975—), 男, 四川人, 工程硕士, 高级工程师, 从事火力指挥与控制系统研究与开发。

一般假定, 在提前时间内和观察时间内的运动规律为匀速直线运动。该假定大体概括了空中目标的各种运动规律, 具有可靠的现实意义。这是因为:

- 1) 运动惯性定律决定目标在短时内不容易突然、迅速地改变方向和速度;
- 2) 目标的构造特点和性能决定在短时内, 即使改变速度和方向, 改变的范围也不会太大;
- 3) 目标要执行其任务, 例如瞄准攻击、侦察、保持编队作战和节省飞行时间与燃料等, 都经常按照上述假定飞行。

2.2 火炮跟踪瞄准误差

火炮跟踪过程会有误差(失调角), 还存在死界范围, 分为机械限制死界范围和瞄准速度死界范围。当射击诸元处于机械限制死界范围时, 火炮不能进入, 而诸元速度处于瞄准速度死界时, 跟踪不上, 误差都将增大。因此, 为确保射击能取得期望的效果, 降低不必要的弹药消耗, 一般设计有大失调角禁射控制功能, 误差大于设定值时, 禁止开火。

此外, 考虑到地形地物的遮蔽、重要场所以及人民生命财产安全, 在高炮系统中往往设计有二维(方位、射角)禁射界, 在此区域禁止开火, 甚至禁止火炮指向该区域。对于可控近炸引信尚在探讨三维(方位、高低、斜距离)禁射界。

2.3 火力密集度

包裹目标的火力密集度越高, 弹群命中目标的可能性越大, 毁伤能力自然更强, 开火时机应选在火力密集度足够高的时刻。影响火力密集度的主要原因有火炮自身的射速、偶然射击条件不一致引起的射弹散布以及提前点运动速度等。

2.3.1 射弹散布

高炮射击学中, “着发”射击用方向和高低中间偏差描述射弹散布; “空炸”射击, 用方向、高低、斜距离、水平距离、射弹飞行时间等中间偏差来描述射弹散布。射表中表定中间偏差是用实弹射击和理论计算相结合求得, 使用时可根据射击条件从中查出。表 1 为 59 式 57 高炮的公算偏差表, 可见随着飞行时间增大, 各中间偏差会随之增大。这是因为射弹飞行时间(斜距离)增大, 偶然射击条件的作用效果随之加大, 弹道逐渐分散, 射弹散布增大。方向散布小于高低散布, 且“空炸”射击时的斜距离散布又大于高低散布, 均随提前时间增加而增大。

用方向、高低和斜距离中间偏差(r_z, r_N, r_D)确定的椭球 F 表达空炸射击的空间散布情况。其中, 方向、高低误差面是垂直于炮和提前点连线, 斜距离

误差通过炮与提前点连线, 椭球中心为提前点。椭球体积越小, 表示火力在该点的密集度越高。

表 1 59 式 57 高炮公算偏差

飞行时间 t/s	高低公算偏差/m	方位公算偏差/m
1	0.4	0.3
2	0.8	0.5
3	1.1	0.8
...
15	4.4	2.6
16	4.7	2.7

2.3.2 提前点运动速度

假定无射击诸元误差与射弹散布, 也就是射弹均能直接命中目标, 此时射弹在航路上的火力密集度可用单位提前航路段内的弹数表示。此时火力密集度与火炮射速和提前点速度有关。在射速一定时, 火力密集度的大小就仅与提前点运动速度有关。提前航路指的是解命中三角形解出的提前点轨迹, 如目标无机动且与运动假定一致, 则提前点轨迹与目标航路在有效射程内是重合的, 运动速度有差异。

提前点运动速度 V_q 和目标运动速度 V_m 有关。在图 1 中, 目标沿航路 L 匀速直线飞行, 目标由 M_1 运动到 M_2 的时间为 $1s$, 相应的提前位置由 M_{q1} 运动到 M_{q2} , 则有: $V_m = \overline{M_1M_2}$, $V_q = \overline{M_{q1}M_{q2}}$ 。

因有:

$$\overline{M_1M_{q2}} = \overline{M_1M_2} + V_m t_{f2} = \overline{M_{q1}M_{q2}} + V_m t_{f1}$$

$$\text{最终可得: } V_q = V_m + V_m(t_{f2} - t_{f1})$$

由此可知: 临近时, $t_{f2} < t_{f1}$, $V_q < V_m$; 远离时, $t_{f2} > t_{f1}$, $V_q > V_m$; 只有在航路捷径附近时, 才有可能有 $t_{f2} = t_{f1}$, $V_q = V_m$ 。

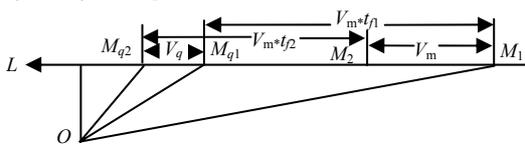


图 1 现在点与提前点态势图

采用同样的方式射击, 在单位航程上, 临近航路段的弹迹比远离航路段上的多。由于 V_q 的作用, 在火炮射速 N_s 一定的情况下, 每发弹的散布椭球中心的分布间距将随 V_q 增大而增大。因此, 高炮通常会力争在临近段开火射击。

2.4 相对速度

目标由临近到远离的过程, 是射弹与目标的相对速度是逐渐减小过程。通常采用快速迭代法解命中问题, 快速迭代法的特征值 $I(A)$ 的物理意义是相遇点的目标距离变化率和炮弹末速度之比, 即:

$$I(A) = \frac{\text{目标距离变化率}}{\text{炮弹末速度}}$$

在航路临近段 $I(A) < 0$ ，远离段 $I(A) > 0$ 。远离过程中，当 $I(A)$ 接近于 1 时，目标运动速度在炮弹存速切线方向上的速度分量接近于炮弹存速，炮弹几乎追不上目标，射击已失去意义。此后段的航路段提前方程组将无解（射弹与目标在航路上无相遇点），应停止射击，转移火力去攻击下一目标。提前距离增大时，弹丸的末速度随之降低，动能下降，毁伤能力减弱。

3 辅助决策方法

3.1 假设条件

最佳开火时机辅助决策是基于以下几个假设：

假设 1：射击诸元无偏差。

假设 2：忽略火炮瞄准误差（实际中其值很小）。

假设 3：弹丸穿入以航路点为中心的球体（“着发”射击为圆） K （半径 r_K ），则认为可命中目标。

3.2 决策的基本原理

最佳开火时机是指此刻射击，弹群在提前航路段上的密集度达到最佳。弹群密集度的大小由单位长度提前航路内能发射的弹丸数量与每发弹的空间散布大小共同决定。能发射的弹丸数量越多，各发弹的散布误差越小，弹群的密集度也就越大，此时命中目标的可能性越大。

决策的基本原理为：在单位提前航路段内能发射的所有弹至少一发命中目标的概率 P_{zs1} 达到设定的最低可接收值 P_{min} ，且弹丸有足够的动能毁伤目标，就认为达到最佳开火时机。引入比例因子 K_b ，称 K_b 为开火决心因子， $K_b \geq 1$ ，则进入最佳开火时期。先不考虑动能， K_b 计算为：

$$K_b = \frac{P_{zs1}}{P_{min}} \tag{1}$$

考虑弹丸动能对目标的毁伤效果时，设定弹丸与目标间的相对存速 V_{DCS} 大于某常量 V_{HS} 时，则认为能毁伤目标，小于 V_{HS} 时，毁伤效果随动能成比例下降。此时 K_b 的计算如下：

$$K_b = \begin{cases} \frac{P_{zs1}}{P_{min}} & (V_{DCS} \geq V_{HS}) \\ \left(\frac{V_{DCS}}{V_{HS}}\right)^2 \times \frac{P_{zs1}}{P_{min}} & (V_{HS} > V_{DCS} > 0) \end{cases} \tag{2}$$

3.3 相关参数计算

3.3.1 单发命中概率 P_{df}

由第 2 节可知，“空炸”射弹误差为三维空间散布，各维误差的数学期望为 0，中间偏差为 (r_z, r_N, r_D) ，均服从正态分布规律。弹丸穿入球 K 的概率为单发命中概率 P_{df} ，可通过椭球 F 与球 K 的

交汇，以空间误差概率分布规律计算得出。而“着发”射击，弹丸穿入圆 K 的概率为单发命中概率，可通过圆 K 与由高低、方向二维误差确定椭圆的交汇，按二维误差概率分布规律计算。

同一点的 $r_z < r_N < r_D$ ，为简化计算，在辅助决策中可用高低散布近似替代二维或三维射弹散布。高低偏差 g 为随机变量，服从正态分布规律，数学期望为 0，单发命中概率 P_{df} 为由 K 的半径决定的误差带 $(-r_K, +r_K)$ 在高低散布误差中出现的概率，计算公式为：

$$P_{df} = P(-r_K \leq g \leq +r_K) = \int_{-r_K}^{+r_K} \phi(g) dg = \int_{-r_K}^{+r_K} \phi(g) dg \tag{3}$$

实际应用中，可由射表获得各航路点的高低偏差的中间差 r_N ， $r_N = f_{r-n}(H, D)$ 或 $r_N = f_{r-n}(t_f)$ 。其中 H 、 D 为航路点的高度和水平距离， t_f 为弹丸飞行时间。

实验和理论计算证明：误差量出现在 0 到 $\pm r_N$ 范围内，出现概率各为 25%；误差量出现在 $\pm r_N$ 到 $\pm 2r_N$ 范围内，出现概率各为 16%；误差量出现在 $\pm 2r_N$ 到 $\pm 3r_N$ 范围内，出现概率各为 7%；误差量出现在 $\pm 3r_N$ 到 $\pm 4r_N$ 范围内，出现概率各为 2%。因此，可用查表插值的方式计算 P_{df} 。

3.3.2 多发弹命中一发概率 P_{zs1}

由于单位提前航路段距离（或弹丸飞行时间）变化小，所以在该航路段内各点的单发命中概率 P_{df} 差别小，近似为各发弹等概率命中。设单位提前航路段内的可射弹数为 N_d ， N_d 发中至少一发命中目标的概率计算为：

$$N_d = N_{ss} \frac{L_d}{V_q} + 1$$

$$P_{zs1} = 1 - (1 - P_{df})^{N_d} \tag{4}$$

其中 L_d 为设定的单位长度， N_{ss} 为火炮射速。

3.3.3 相对存速计算

令目标距离变化率为 V_D ， $V_D = -V_m \cos(q_H)$ 。其中 q_H 为目标航路角，是火炮与目标的连线与目标运动方向的夹角。在航路临近时 $q_H < 90^\circ$ ， $V_D < 0$ ，远离时， $q_H > 90^\circ$ ， $V_D > 0$ 。由快速迭代法的特征值 $I(A)$ 的物理意义计算炮弹在提前点的末速度为：

$$V_{MS} = \frac{V_D}{I(A)} \quad (\text{非航路捷径处即 } I(A) \neq 0)$$

则有式 (5)。

$$V_{DCS} = V_{MS} - V_D = \frac{V_D}{I(A)} - V_D = -V_m \cos(q_H) \left(\frac{1}{I(A)} - 1 \right) \quad (5)$$

3.4 辅助决策流程

辅助决策由火控计算机完成, 在完成提前点、射击诸元计算后, 判断是否满足禁射条件, 并根据 $I(A)$ 值判断是否转移火力, 在不满足禁射和转火条件时计算 K_b 值, 作为下定开火的依据, 流程如图 2。

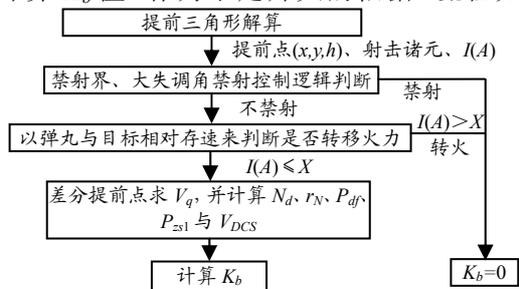


图 2 开火时机辅助决策流程

4 实例仿真与分析

以 57 高炮和某多管 25 高炮进行了实例仿真分析, 仿真结果见表 2、表 3。仿真用的相关参数如下:

1) 57 高炮

航路: 水平等高匀速, 捷径 980 m, 速度 150 m/s

$$P_{\min} = 0.8, \quad L_d = 50 \text{ m}, \quad N_s = 2,$$

$$r_k = 0.5, \quad V_{HS} = 500.$$

2) 某多管 25 高炮

航路: 水平等高匀速, 捷径 780 m, 速度 250 m/s

$$P_{\min} = 0.8, \quad L_d = 30 \text{ m}, \quad N_s = 70,$$

$$r_k = 0.3, \quad V_{HS} = 500.$$

(上接第 57 页)

表 2 陀螺性能参数测试数据

陀螺型号	性能参数				
	零偏/ mV	标度/ (mV·°)⁻¹·s⁻¹	标度非线性	噪声/ mV(1σ)	
出厂	GAM-1G	0.6	100	0.012%	1.2
标定	VG910	1.1	50	0.005%	3.2
	G50Z-LN	2	100	0.02%	5
实测参数	GAM-1G	0.62	100.30	0.013%	2.1
	VG910	1.07	50.13	0.005%	2.0
	G50Z-LN	1.98	101.20	0.025%	2.5

4 结论

实验结果表明, 该系统具有如下优点:

1) 将信号调理、数据采集、DSP 处理、通讯电路集为一体, 具有集成度高、体积小、处理能力强、功耗低等优点;

2) 实时性好。陀螺误差补偿、噪声处理和解耦算法均采用实时的递推结构, 能为平台伺服系统提供至少 10 kHz 以上的陀螺测量信号;

3) 通用性强。除了能够完成各种类型陀螺的高速度、高精度、宽动态范围的数据采集之外, 也适

表 2 57 高炮仿真结果

提前距离	K_b		P_{zsl}		P_{df}		N_d	
	航前	航后	航前	航后	航前	航后	航前	航后
1 000	1.2	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	1.7	1.6
1 500	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.6	1.8	1.5
2 000	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	1.8	1.5
3 000	0.5	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	1.8	1.5
4 000	0.37	0	0.3	0.1	0.2	0.1	1.9	1.4
5 000	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0.1	2	1.3

表 3 某多管 25 高炮仿真结果

提前距离	K_b		P_{zsl}		P_{df}		N_d	
	航前	航后	航前	航后	航前	航后	航前	航后
800	1.25	1.17	1.0	1	0.6	0.6	10	9
1 200	1.25	0.4	1.0	0.98	0.4	0.4	11	7
1 500	1.24	0.2	0.99	0.91	0.31	0.31	12	6
2 000	0.95	0	0.95	0.72	0.21	0.21	13	5
2 500	0.7	0	0.9	0.51	0.15	0.15	14	4
2 800	0.5	0	0.85	0.4	0.11	0.12	15	4

从仿真结果可看出, 虽然航前远处单位航程内分布的弹丸数量多, 但由于射弹散布大而使得单发命中概率低, K_b 值小, 不利于开火射击; 过航后, 由于单位航程内弹丸数量的减少, 以及动能的迅速下降, 使得 K_b 值下降速度加快, 且目标速度越高其下降速度也越快。

5 结束语

从实例仿真结果可知, 最佳开火时机决策方法符合防空高炮系统实际情况, 能应用到实际的工作中去。该辅助决策系统还可应用于无人值守自主作战的防空高炮武器平台。

参考文献:

[1] 周启煌, 等. 战车火控系统指挥系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 123-130.

用于其它装置的数据采集系统。

参考文献:

[1] 王家琪, 金光. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.

[2] 杨胜, 房建成. 基于双DSP的POS数据采集与处理系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1821-1826.

[3] 崔旭涛, 杨日杰, 何友. 基于DSP+FPGA的信号处理实验系统研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 918-922.

[4] David H T. Strapdown inertial navigation technology [M]. UK: The Institution of Electrical Engineers, 2004: 59-115.

[5] Quang M L. Gyro modeling and estimation of its random noise sources[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Austin, Texas, 2003: 1-12.

[6] DEMOZ G, ROGER C.H. Design of Multi-Sensor Attitude Determination Systems[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 627-648.

[7] 易康, 李廷志, 吴文启. FLP滤波算法在光纤陀螺信号预处理中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(5): 58-62.

[8] 朱华征, 周晓光, 范大鹏. 光电稳定平台中陀螺随机漂移的处理方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 11-16.