

防空高射炮火控系统命中算法研究

王芳, 孙运强, 姚爱琴

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 高射炮作为防空作战体系中最后的末端拦截手段, 主要拦截 3 km 内的末端运动目标, 其命中概率直接关系到被掩护目标的安危, 高射炮火控系统的解算能力及射击诸元精度影响高射炮的命中概率。介绍了火控系统的工作原理, 并对弹头命中飞行目标的算法进行了研究。

关键词: 高射炮; 火控系统; 算法

中图分类号: TJ35

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)13-0069-03

Algorithmic research about hitting the target in the fire control system of antiaircraft artillery

WANG Fang, SUN Yun Qiang, YAO Ai Qin

(Institute of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Antiaircraft artillery is only as a last resort of interception to attack targets within 3 kilometer and shooting probability relates the safety of secured targets. Solution capacity of the fire control system and the precision of shooting parameters influence shooting probability of antiaircraft artillery. The paper introduces working principle of the fire control system and researches on the algorithm of the warhead hitting the flight goal.

Key words: antiaircraft artillery; fire control system; algorithm

现代战争证明, 高射炮是现代防空武器系统的重要组成部分, 在抗击低空目标中仍可发挥重要作用。高射炮具有独特的抗低空、抗饱和、抗干扰和反导作战能力, 因此其发展变化很快。机动模式有牵引、车载自行、舰载等多种模式, 先进的火控系统提升了高炮系统的自动化、智能化水平以及作战效能。对抗手段由单一的火炮发展为弹炮结合, 并综合了激光告警、激光诱骗等多种技术手段, 已发展成为复杂的综合武器平台。配置的弹药呈多样化, 大大提高了高炮武器系统的作战效能^[1]。

高炮作为防空作战体系中最后的末端拦截手段, 其命中概率直接关系到被掩护目标的安危。火控计算机输出的射击诸元精度影响高射炮武器系统的命中概率, 为此, 本文针对火控系统求解炮弹与飞行目标的相遇问题进行了深入的研究, 为进一步计算高精度射击诸元打下良好基础。

1 防空高炮火控系统

高射炮对空中目标射击, 通常使用搜索跟踪装置搜索、发现和跟踪目标, 并连续测定目标坐标。通过火控系

统计算射击诸元(提前方位角、射角和使用时间引信时的引信值), 并将射击诸元连续赋予高射炮, 使高射炮身管连续指向目标提前位置。高射炮按指令及时发射, 使弹丸直接命中目标或在目标附近爆炸以破片毁伤目标。火控系统在现代战争中发挥着越来越重要的作用。

高炮火控系统是高炮火力控制系统的简称, 是控制火炮自动或半自动地实施瞄准与发射的装备总称。火控系统是战术 C³I(指挥、控制、通信与智能)系统的一个重要终端, 完成搜寻、跟踪目标, 并按照指控系统的指令及要求发射弹头的命令实施射击^[2]。准确、实时地求解出射击诸元并将其赋予火炮身管是火控系统的核心任务。为了完成此项任务, 必须瞄准并跟踪目标, 预测弹头与目标的相遇点, 控制火炮对相遇点进行射击。比较典型的自行防空高炮火控系统主要有: 搜索雷达、跟踪雷达、光电跟踪系统、定位定向系统、姿态传感器、火炮随动系统、火控计算机、操控计算机、时钟统一装置等, 系统之间采用总线进行信息交互^[3]。高炮火控系统的基本工作原理如图 1 所示。

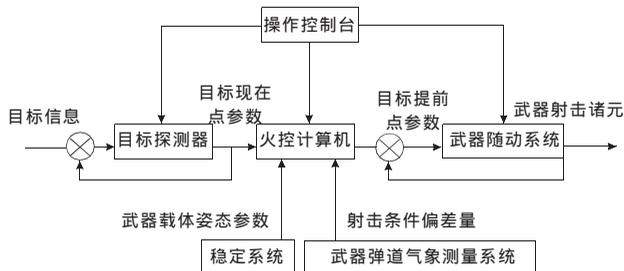


图1 高射炮火控系统工作原理

目标探测器完成搜索、识别、显示、跟踪目标与测定目标参数,并将获得的目标信息传给火控计算机;载体参数测量装置完成载体参数测量并传给火控计算机;弹道与气象条件测量装置测量有关参数并传给火控计算机;火控计算机根据目标信息、载体信息、弹道与气象条件,利用弹道模型,计算火炮射击诸元,通过随动系统将火炮转动至计算的射击诸元位置,实时控制火炮射击。射击后,测定落点诸元,计算落点偏差量,再由火控计算机计算修正量,根据修正量确定下一发射弹的射击诸元,控制下一发射弹射击。

2 命中目标原理与算法

2.1 命中目标原理

炮弹命中目标,主要是火控系统求解弹头与目标相遇的问题,其实质就是要确定炮弹与运动目标在空间相遇点的位置,当炮弹飞到该点时,目标也刚好到达该点,两者相遇达到命中目标的目的。高射炮系统的射击诸元计算装置,按照空中目标作有规则运动的假定解决弹丸与目标相遇的问题。计算装置通常采用等速直线运动假定,也有采用匀加速直线和曲线运动假定。当目标飞行状态与目标运动假定相符时,射击将取得理想效果,否则射击将出现偏差^[4]。高射炮对空中目标射击如图2所示。

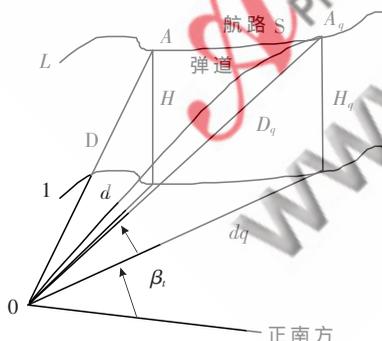


图2 高射炮对空中目标射击

高炮位于O点对空中运动目标进行射击,目标t时刻位于A点,相对于高炮的斜距离为D。由于目标快速运动,当高炮向A点发射炮弹时,不考虑随机因素作用下,炮弹经一定飞行时间到达A点,此时目标已经飞到航路前方的A_q点,所以这种射击不能命中目标。为使炮弹击中目标,t时刻高炮必须向A_q点瞄准,这样炮弹和目标才有可能同时到达该点。

目标运动方程可用下式矢量多边形描述,即:

$$D_q = D + S = D + vt_f \quad (1)$$

S为在炮弹飞行时间内目标运动的距离,称为“提前量”;v为目标在AA_q间的速度矢量;t_f为炮弹飞行时间又称为目标运动的“提前飞行时间”;D为已知量,由雷达或光电测定;D_q为目标相对于高炮提前斜距离矢量。

在分析炮弹与目标相遇问题时,除了可以建立描述目标运动规律的方程以外,还可以建立炮弹飞行的有关方程。描述炮弹飞行轨迹的方程称为弹道函数方程或弹道方程,炮弹飞行时间t_f和提前斜距离矢量D_q是两个弹道函数,它们是高炮定型后,由国家靶场经过实弹射击与理论计算确定的,以射表形式记录。根据射表可以确定目标与炮弹相遇时关于t_f和D_q的弹道方程,即:

$$t_f = f(D_q) \quad (2)$$

两式联立即:

$$\begin{cases} D_q = D + S = D + vt_f \\ t_f = f(D_q) \end{cases} \quad (3)$$

上述两式联立的方程组就是解相遇问题的基本矢量方程式^[5]。

数字式火控系统采用数字计算方法求解相遇问题。由于数字计算机能够比较容易地实现复杂函数运算,并受数字滤波计算目标运动参数形式的约束,所以目前通常是将矢量方程向直角投影轴系投影,建立数字式火控系统解相遇问题的数学公式,即:

$$\begin{cases} X_q = X + f_x(t_f) \\ Y_q = Y + f_y(t_f) \\ H_q = H + f_H(t_f) \\ D_q = g(t_f) = \sqrt{X_q^2 + Y_q^2 + H_q^2} \\ t_f = f(D_q, H_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中:X、Y、H为目标现在点坐标,X_q、Y_q、H_q为目标与炮弹相遇点坐标,函数f_x(t_f),f_y(t_f),f_H(t_f)是炮弹飞行时间内3个直角坐标改变量,其形式取决于目标运动规律的假定。

2.2 快速迭代法

通过快速迭代法求解上述非线性隐含方程组。设相遇点A(X_q, Y_q, H_q)快速迭代法求解相遇点处炮弹飞行时间的迭代数列满足^[6]:

$$\begin{cases} t_f^{(0)} = t_f^{(0)} \\ t_f^{(-1)} = s^{(i)} t_f^{(i)} + (1-s)^{(i)} t_f^{(i-1)} \\ s^{(i)} = 1/(1-I(A^{(i-2)})) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

s⁽ⁱ⁾为平方收敛速度最快意义下的迭代权系数,I(A)为相遇点处的特征值。t_f⁽ⁱ⁾迭代方程式(2)直接计算出来的迭代数列,即为简单迭代数列。

(1)I(A)的定义及物理意义:

$$I(A) = \frac{\partial f}{\partial X_q} v_{x_s} + \frac{\partial f}{\partial Y_q} v_{y_s} + \frac{\partial f}{\partial H_q} v_{H_s} \quad (6)$$

技术与方法 Technique and Method

其中, $\{\frac{\partial f}{\partial X_q}, \frac{\partial f}{\partial Y_q}, \frac{\partial f}{\partial H_q}\}$ 为炮弹在 X_q^0, Y_q^0, H_q^0 方向上 A 点处移动单位距离所用的时间; $(v_{x_a}, v_{y_a}, v_{H_a})$ 为目标在 A 点 X_q^0, Y_q^0, H_q^0 方向上的分速度。

$I(A)$ 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:

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

$I(A)$ 是一个无量纲的数。 $I(A)$ 的符号与目标在 A 点的距离变化率符号相同。当 $I(A) \leq 0$, 表示相遇点是临近的; 当 $I(A) > 0$ 表示相遇点是远离的。对于远离目标, 当 $I(A)$ 接近于 1 时, 表明相遇点目标远离的距离变化率接近于炮弹末速度, 炮弹在相遇点与目标相撞的相对动能很小, 达不到摧毁目标的目的。在这种情况下, 求解相遇问题已经失去了实际意义。从战术上说, 完全可以放弃这个目标而转换火力去对付其他的威胁目标。由此可见, 特征值 $I(A)$ 可以作为火控技术中的一个示性数。事实上, 快速迭代法正是充分利用了这一特征。

(2) $I(A)$ 的近似求解

在 $I(A)$ 的定义中, 偏导数分别用其相应的差商近似, 经过一系列的变换得^[7]:

$$I(A) = \frac{t_f^{(i)} - t_f^{(i-1)}}{t_f^{(i-1)} - t_f^{(i-2)}} \quad (\text{当 } t_f^{(i-1)} \neq t_f^{(i-2)} \text{ 时}) \quad (7)$$

将式(7)代入权系数的 $s^{(i-1)}$ 计算公式中, 可得:

$$s^{(i+1)} = \frac{1}{1 - \frac{t_f^{(i-1)} - t_f^{(i-2)}}{t_f^{(i-2)} - t_f^{(i-3)}}} \quad (8)$$

实验结果表明: 用式(8)计算得到的 $I(A)$ 与用定义式得到的值之间的误差一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间, 两种计算方法可以达到几乎相同的收敛速度。并且对于相遇点距离变化率绝对值在 1 000 m/s 之内的运动目标, 当限定迭代精度 $\varepsilon = 10^{-5}$ s 时, 一般迭代 3 次即可。

(3) 迭代初值的选择

在火控系统的实际应用中, 通常按式(9)选择炮弹飞行时间的初值^[8]:

$$t_f^{-(0)} = \frac{(t_{f_{\min}} + t_{f_{\max}})/2}{t_{f_0}} \quad (9)$$

其中, t_{f_0} 为上一次迭代过程计算出来的炮弹飞行时间值, $t_{f_{\min}}, t_{f_{\max}}$ 为有效的炮弹飞行时间最大值与最小值。

高炮射击时的射向和决定炮弹爆炸时机的参数称为高炮射击诸元。高炮射击诸元并不是目标的提前点坐标, 这是由高炮的性质决定的。所以高炮射击并不是直接瞄准 A_q 点, 而是按照一个虚拟提前点 p 射击, 经弹道下降量、偏流等射击条件偏差的综合影响, 最后炮弹在航路上的 A_q 点与目标相遇。

鉴于高射炮在现代战争中仍然发挥着其他强力武器不可替代的作用, 本文介绍了防空高射炮火控系统的工作原理及命中目标原理, 为了达到炮弹命中目标的目的, 主要研究了火控计算机解炮弹与飞行目标的相遇问题。为火控系统进一步求解射击诸元奠定了基础, 同时有利于高射炮打击低空目标的实时性与精准性的研究。

参考文献

- [1] 杨培根. 火力控制系统总论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1998.
- [2] 魏云升, 郭治, 王校会. 火力与指挥控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [3] 李文才. 防空高炮火控系统射击诸元在线自校正研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [4] 郭吉成. 高炮火控系统射击问题算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [5] 胡绍勇, 朱齐丹. 快速解决命中的一种改进算法[J]. 火力指挥与控制, 1998, 23(1): 65-69.
- [6] 郑奕. 某型高炮火控系统跟踪技术与命中方程研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [7] 黄克明. 火炮火控系统命中解的分布和存在性[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(1): 27-29.
- [8] 李道京. 机动目标命中问题的求解[J]. 火控雷达技术, 1997, 26(3): 24-30.

(收稿日期: 2009-12-14)

作者简介:

王芳, 女, 1984 年生, 硕士, 主要研究方向: 智能信息系统。