

# 一种高炮射弹偏差计算方法及其仿真

张广申 毛 征 王 宁 张 晨

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

**摘 要:**射弹偏差计算技术对鉴定和评估高炮射击准确性起着关键作用,在计算机上进行高炮射弹偏差仿真有利于提高试验和研制质量,节省试验和研制经费。为提高射弹偏差计算准确度,更加准确快速地在计算机上进行仿真,本文基于匀速直线运动目标模型,提出了一种高炮射弹偏差计算方法,详细介绍了该算法的计算过程,并以某型高炮为例进行了仿真计算,对仿真结果进行了分析。结果表明,该算法精度较高,仿真准确快速。该算法仿真结果可以用于作战仿真射击效果评估,能够更好地对高炮作战能力做出判断,具有一定工程实用价值。

**关键词:**射弹偏差;弹道解算;坐标转换;系统仿真

**中图分类号:** TN95    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## One algorithm of antiaircraft guns projectile deviation and its simulation

Zhang Guangshen Mao Zheng Wang Ning Zhang Chen

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The technique of projectile deviation calculation plays a key role in identifying and assessing the accuracy of anti-aircraft guns, and do the simulations can help improve the quality and save costs of testing and development. To improve the projectile deviation calculation accuracy and do the computer simulation more quickly and accurately, an algorithm based on the target model of uniform linear motion is proposed in the paper. The calculation process of the algorithm is described in detail. The computer simulation based on one kind antiaircraft gun is done, and the simulation results are analyzed. The results show that the algorithm is more accurate and do the simulation faster. What's more, the simulation results of the algorithm can be used to assess the effect of shooting, and can be used to make judgments on the combat capability of antiaircraft guns, so it has certain practicability.

**Keywords:** projectile deviation; trajectory calculation; coordinate transformation; system simulation

### 1 引 言

现代战争是信息化战争,具有高烈度、高技术等特点,其重要组成部分是空袭与反空袭。在地对空导弹已成为地面防空主力的今天,高炮系统作为地面防空系统的重要组成部分,在拦截各种低空或突破至近处的飞行器发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。

随着信息化、智能化技术的快速发展,高炮的技术水平不断得到提升,而射击精度则是鉴定与评估高炮性能的重要指标之一<sup>[2]</sup>,为了准确射击目标,提升高炮的整体性能,必须计算高炮对空中目标的射弹偏差。正因为射弹偏差参数及精度在武器系统的定型、抽检试验中具有重要作用,所以各使用单位,都十分关注射弹偏差的测量方法及

处理精度<sup>[3]</sup>。

本文基于匀速直线运动目标模型,提出了一种高炮射弹偏差计算方法,并通过进行仿真以及对仿真结果进行分析来对高炮射弹偏差计算技术进行研究。

### 2 算法视景环境

本算法建立的视景环境是基于一个模拟的给定数据的虚拟仿真实空间。

如图1所示,在这个空间里,假定空中目标是从 $Q$ 点向 $U$ 点航行, $P$ 为 $QU$ 中点, $R$ 、 $S$ 和 $W$ 分别为 $Q$ 、 $P$ 和 $U$ 的投影,航路捷径在 $S$ 点。观测者在 $O$ 点(高炮炮塔回转中心)对此目标进行观测,该观测者与空中目标的垂直方向投影的距离为 $D_j$ ,空中目标距地面的垂直距离为 $H$ 。

$(X_T, Y_T, Z_T)$ 和 $(X, Y, Z)$ 分别为空中目标坐标系和载体坐标系。空中目标坐标系 $(X_T, Y_T, Z_T)$ 坐标原点在目标的几何中心, $Y_T$ 轴沿目标质心速度方向,向前为正; $Z_T$ 轴位于铅直平面内,向上为正; $X_T$ 轴与 $Y_T$ 轴、 $Z_T$ 轴构成右手坐标系,远离观测点为正。载体坐标系 $(X, Y, Z)$ 坐标原点在火炮塔回转中心, $X$ 轴沿载体横轴方向,向右为正; $Y$ 轴沿载体纵轴方向,向前为正; $Z$ 轴垂直于载体,向上为正, $X$ 轴、 $Y$ 轴和 $Z$ 轴构成左手坐标系。载体横轴与目标运动方向平行。如图1所示,目标在Q点时的高低角为 $\epsilon$ 、方位角为 $\alpha$ ,方位角为从 $X$ 轴正向方向线起依逆时针方向到观测线在水平面的投影线之间水平夹角。

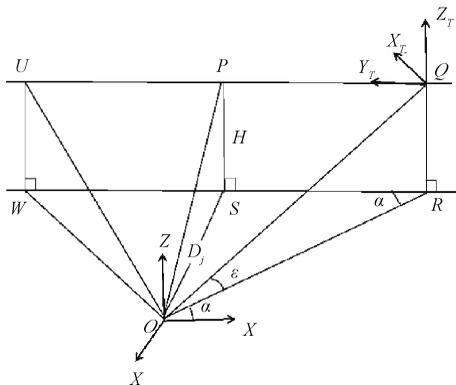


图1 目标姿态投影关系

### 3 高炮射弹偏差

在高炮对目标进行射击时,由于空中目标的位置是不断变化的,故需要在当前时刻对目标以后时刻的位置进行预测,并将其位置提供给高炮火控系统<sup>[4]</sup>。因此,应确定目标的运动方式并进行目标模型的选择。目标模型有匀速直线运动模型、匀加速度模型、随机加速度模型、“当前”统计模型、转弯模型等<sup>[5]</sup>。本算法选择匀速直线运动模型,即目标在空中做匀速直线运动。同时,由于线性弹道模型较简单,应用于计算机进行弹道计算时计算速度较快,且精度满足工程应用要求<sup>[6]</sup>,所以本算法选择的弹道模型为线性弹道模型。

如图2所示,首先,根据航迹计算出高炮每次射击时刻的目标现在点位置(载体坐标系),通过射表计算出每次射击时刻的目标未来点 $A(x_1, y_1, z_1)$ (此为理论值)。然后,根据航迹计算出每个火控周期时间点的目标现在点位置(火控周期为 $T$ ),对其进行射表计算出每个火控周期时间点的目标未来点位置并将其转换为高低角、方位角和距离,用拉格朗日插值法插值出每次射击时刻的目标未来点的高低角 $\epsilon$ 、方位角 $\alpha$ 和距离 $D_q$ 。最后,在高低角 $\epsilon$ 和方位角 $\alpha$ 不变的情况下通过试凑 $D_q$ ,求出弹道轨迹上距目标点 $A(x_1, y_1, z_1)$ 最近的点 $B(x_2, y_2, z_2)$ (此为实际值),此时点 $A$ 与点 $B$ 的偏差为射弹偏差。

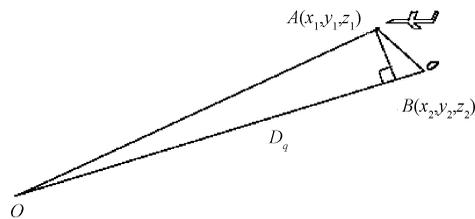


图2 射弹偏差示意

令

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_1 - x_2 \\ \Delta y &= y_1 - y_2 \\ \Delta z &= z_1 - z_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

则 $\Delta D$ 即为射弹偏差。

## 4 高炮射弹偏差计算方法

本文提出的算法主要分为航迹生成、射表计算、拉格朗日插值、射弹偏差计算、坐标转换和系统仿真几个模块,首先从雷达得到目标数据并生成一条航迹,所得到的航迹数据再通过射表计算模块、拉格朗日插值模块、射弹偏差计算模块和坐标转换模块这几部分的计算得到射弹偏差,并将弹着点投影到观测面上,最后通过系统仿真将射弹偏差情况显示出来,并对射弹偏差进行分析。

### 4.1 射表计算

射表为指挥射击和获得有效炮兵火力提供所需要的弹道数据、射击偏差修正数据等,是武器系统中极其重要的组成部分<sup>[7]</sup>。现在高炮系统依然普遍采用射表或射表逼近函数进行射击诸元的解算。

本算法假定目标在载体坐标系 $(X, Y, Z)$ 中做匀速直线飞行,在某个射击时间点,目标现在点水平直角坐标为 $(x_n, y_n, z_n)$ ,目标未来点(即命中点)水平直角坐标为 $(x_q, y_q, z_q)$ 。

弹丸飞行时间:

$$t_f \propto f(D_q, H_q) \quad (2)$$

为表格函数,其中 $D_q$ 和 $H_q$ 分别为目标未来点的距离和高度。

目标未来点水平直角坐标 $(x_q, y_q, z_q)$ 的计算:

$$\begin{aligned} x_q^i(k) &= x_n(k) + V_x \times t_f^i(k) \\ y_q^i(k) &= y_n(k) + V_y \times t_f^i(k) \\ z_q^i(k) &= z_n(k) + V_z \times t_f^i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $k$ 为仿真时间, $i$ 为迭代次数,用来反复计算目标未来点坐标值。 $V_x$ 、 $V_y$ 和 $V_z$ 为目标在相应方向上的速度, $t_f^i(k)$ 为弹丸飞行时间。

当 $i=0$ 时, $t_f^i(k) = t_{f0}$ 赋予一个初值。计算目标未来点的距离和高度( $D_q, H_q$ ):

$$D_q^i(k) = \sqrt{x_q^{i2}(k) + y_q^{i2}(k) + z_q^{i2}(k)} \quad (4)$$

$$H_q^i(k) = z_q^i(k) \quad (5)$$

当  $i \neq 0$  时,利用“射表”与“拉格朗日插值方法”计算出弹丸飞行时间  $t_f^i(k)$ ,并与上一次  $t_f^{i-1}(k)$  值进行比较,如果:

$$|t_f^i(k) - t_f^{i-1}(k)| < \epsilon \quad (6)$$

不满足,则:

$$[t_f^i(k) + t_f^{i-1}(k)]/2 \Rightarrow t_f^{i+1}(k) \quad (7)$$

回到式(3)再计算,直到满足为止。

#### 4.2 射弹偏差计算

首先假定目标初始坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$  (载体坐标系),设定速度为  $v$  (m/s),根据匀速直线运动目标模型生成航迹。

理想状态下的匀速直线运动的航迹公式为:

$$\begin{aligned} \alpha(k) &= 2\pi - \arctan(|y_{Tqc}(k)/x_{Tqc}(k)|) && (x_{Tqc}(k) > 0, y_{Tqc}(k) > 0) \\ \alpha(k) &= \pi + \arctan(|y_{Tqc}(k)/x_{Tqc}(k)|) && (x_{Tqc}(k) < 0, y_{Tqc}(k) > 0) \\ \alpha(k) &= \pi - \arctan(|y_{Tqc}(k)/x_{Tqc}(k)|) && (x_{Tqc}(k) < 0, y_{Tqc}(k) < 0) \\ \alpha(k) &= \arctan(|y_{Tqc}(k)/x_{Tqc}(k)|) && (x_{Tqc}(k) > 0, y_{Tqc}(k) < 0) \\ \alpha(k) &= \pi/2 && (x_{Tqc}(k) = 0) \\ \alpha(k) &= \pi && (y_{Tqc}(k) = 0) \end{aligned} \quad (11)$$

根据火控周期和射弹间隔关系,用射弹时刻  $t$  之前的3个火控周期点的未来点高低角、方位角和距离插值出射弹时间点的未来点  $B'(x'_2, y'_2, z'_2)$  高低角  $\epsilon'$ 、方位角  $\alpha'$  和距离  $D'_q$ 。

此时  $B'(x'_2, y'_2, z'_2)$  的坐标根据式(12)可求得:

$$\begin{aligned} x'_2 &= D'_q \times \cos\epsilon' \times \cos\alpha' \\ y'_2 &= D'_q \times \cos\epsilon' \times \sin\alpha' \\ z'_2 &= D'_q \times \sin\epsilon' \end{aligned} \quad (12)$$

根据已求得的  $t$  时刻目标未来点  $A(x_1, y_1, z_1)$  和式(1),可以求出高炮射弹偏差  $\Delta D'$ ,在高低角和方位角不变的情况下试凑  $D'_q$ 。首先增大  $D'_q$ ,若  $\Delta D'$  减小,则持续增大  $D'_q$ ,每次增加的步长为 0.1 m,直到  $\Delta D'$  增大,增大之前的最小弹目距离  $\min\Delta D$  对应的点  $B(x_2, y_2, z_2)$  即为弹道轨迹上距点  $A(x_1, y_1, z_1)$  最近的点,此时最小弹目距离  $\min\Delta D$  即为射弹偏差  $\Delta D$ ;增大  $D'_q$ ,若  $\Delta D'$  增大,则减小  $D'_q$ ,每次减小的步长为 0.1 m,直到  $\Delta D'$  再次增大,再次增大前的最小弹目距离  $\min\Delta D$  对应的点  $B(x_2, y_2, z_2)$  即为弹道轨迹上距离点  $A(x_1, y_1, z_1)$  最近的点,此时的最小弹目距离  $\min\Delta D$  即为射弹偏差  $\Delta D$ 。

#### 4.3 坐标转换

观测者最终观测到的高炮对空中目标射弹偏差情况实际为与视线方向垂直的平面,即观测面。因此,需要进行坐标变换,将空中目标坐标系变换成与观测者正对的坐标系。此新坐标系建立的依据是,将新坐标系  $(X_t, Y_t, Z_t)$  中  $Y_t$  的负方向设为观测者的视线方向。

$$\begin{aligned} x_t &= x_0 + v_x \times t \\ y_t &= y_0 + v_y \times t \end{aligned} \quad (8)$$

$$z_t = z_0 + v_z \times t$$

由式(8)可以求得某个射弹时刻  $t$  的目标现在点  $(x_{t_c}, y_{t_c}, z_{t_c})$ ,由射表计算出目标未来点  $(x_{q_c}, y_{q_c}, z_{q_c})$ ,即  $A(x_1, y_1, z_1)$ 。然后,由式(8)求出  $t$  时刻前每个火控周期点的坐标  $(x_T(k), y_T(k), z_T(k))$ ,  $k$  为火控周期的个数。经过射表计算,求出每个火控周期点的未来点  $(x_{Tqc}(k), y_{Tqc}(k), z_{Tqc}(k))$ ,并进行高低角和方位角换算。

目标在第  $k$  个火控周期点的未来点距离为:

$$D_q(k) = \sqrt{x_{Tqc}^2(k) + y_{Tqc}^2(k) + z_{Tqc}^2(k)} \quad (9)$$

高低角为:

$$\epsilon(k) = z_{Tqc}(k)/D_q(k) \quad (10)$$

方位角为:

如图3所示,将空中目标坐标系变换成与观测者正对的坐标系需要进行两次转换,先将空中目标所在坐标系绕其  $Z$  轴旋转角度  $\alpha$ ,再将空中目标所在坐标系绕其  $X$  轴旋转角度  $\epsilon$ 。

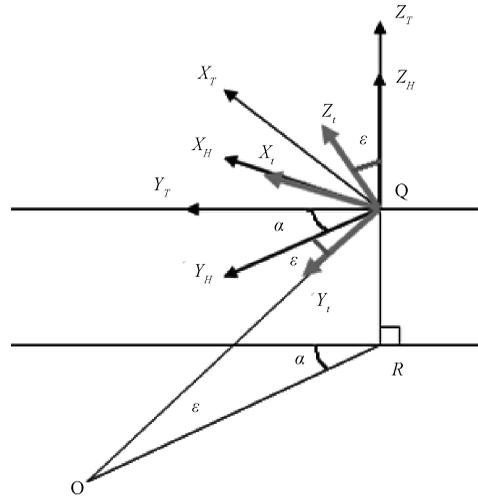


图3 坐标转换示意

第一次坐标转换如图4所示,  $(X_T, Y_T, Z_T)$  构成目标坐标系,  $Y_T$  即为目标飞行方向。  $(X_H, Y_H, Z_H)$  为  $(X_T, Y_T, Z_T)$  旋转角度  $\alpha$  后的坐标系,且  $Y_H$  为瞄准线方向在水平方向上的指向。

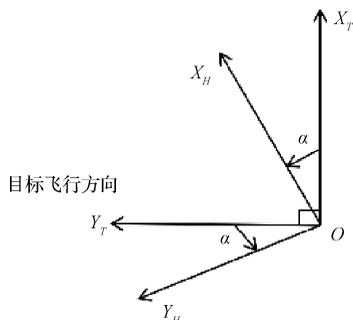


图4 第一次坐标转换示意

从 $(X_T, Y_T, Z_T)$ 坐标系转换到 $(X_H, Y_H, Z_H)$ 坐标系的关系式为:

$$\begin{cases} X_H = \cos\alpha \times X_T + \sin\alpha \times Y_T \\ Y_H = -\sin\alpha \times X_T + \cos\alpha \times Y_T \\ Z_H = Z_T \end{cases} \quad (13)$$

第二次坐标转换如图5所示, $(X_H, Y_H, Z_H)$ 坐标系通过绕 $X_H$ 旋转高低角 $\epsilon$ 后,变成 $(X_I, Y_I, Z_I)$ 坐标系。此时, $Y_I$ 轴为正对观测者的方向,即图中所示的瞄准线方向。

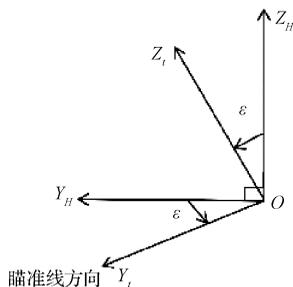


图5 第二次坐标转换示意

从 $(X_H, Y_H, Z_H)$ 坐标系转换到 $(X_I, Y_I, Z_I)$ 坐标系的关系式为:

$$\begin{cases} X_I = X_H \\ Y_I = \cos\epsilon \times Y_H - \sin\epsilon \times Z_H \\ Z_I = \sin\epsilon \times Y_H + \cos\epsilon \times Z_H \end{cases} \quad (14)$$

经过两次旋转,将 $(X_T, Y_T, Z_T)$ 坐标系上的关系转换为在 $(X_I, Y_I, Z_I)$ 坐标系上的关系。再经过仿真,可以将炮弹偏差情况显示出来。

## 5 系统仿真及仿真结果分析

### 5.1 系统仿真

系统仿真是根据系统分析的目的,建立仿真模型,据此进行试验或定量分析,以获得正确决策所需的各种信息。系统仿真方法基本上分为两大类,即连续系统仿真方法和离散系统仿真方法。

离散事件系统是一类以事件发生驱动状态变化的动态系统<sup>[8]</sup>。高炮作战过程由一系列离散事件和活动组成,所以,高炮作战仿真系统采用离散系统仿真方法。本文采用C语言和C++语言编程对算法进行仿真,程序流程如图6所示。纵观自动测试系统的发展历程,从某种意义上可以说是不断追求通用性的过程<sup>[9]</sup>。所以本文在系统仿真时进行了通用化处理。而系统可靠性根本上取决于设计过程,不恰当的设计会导致故障率和返修率的增加<sup>[10]</sup>。所以本文在设计仿真系统时优化了设计过程。

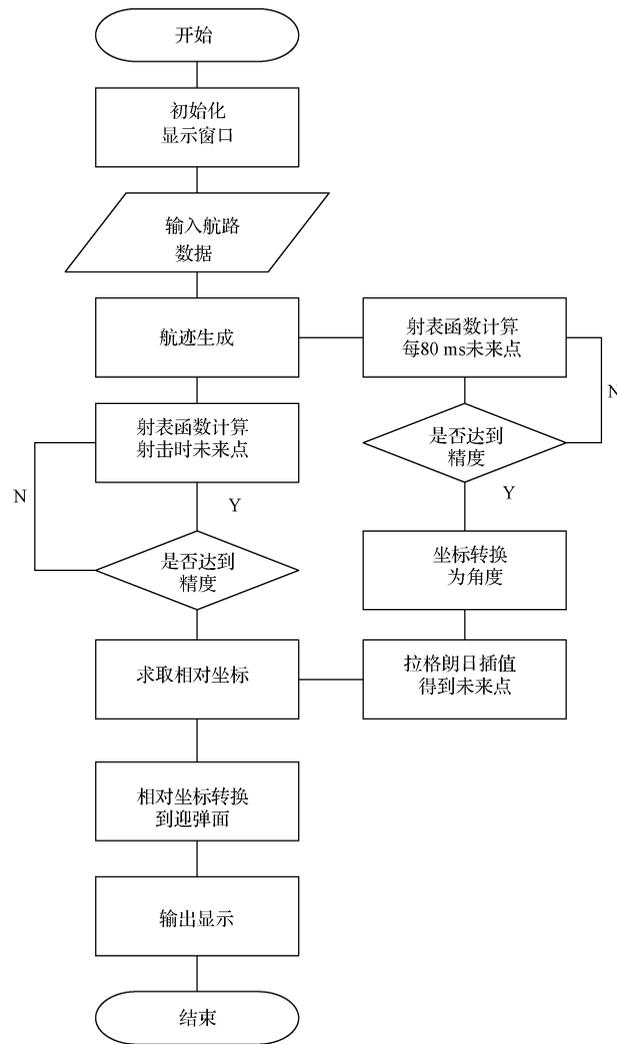


图6 程序流程

### 5.2 仿真结果与分析

假定目标初始位置坐标为 $(1\ 000, -1\ 000, 1\ 000)$ (载体坐标系,单位m),目标在载体坐标系中沿 $X$ 方向以 $-340\ \text{m/s}$ 做匀速直线运动,高炮射速 $900\ \text{发/min}$ (射击间隔 $67\ \text{ms}$ ),火控系统周期为 $80\ \text{ms}$ ,每次射击 $20$ 发炮弹。

使用以上数据,对算法进行仿真计算,仿真结果表明,该算法运行速度较快,经过仿真计算后,得到不同弹着点数据。如图7所示,标靶3个圆环的半径依次为1 m、2.5 m和4 m,图中十字交点为射弹散布中心。当火控周期为80 ms时,弹着点主要散布在半径1 m的圆内,计算准确度较高,弹着点散布中心接近靶心位置,坐标为 $(-0.031, -0.024)$ 。如表1所示为此时弹着点在观测面上的坐标数据。

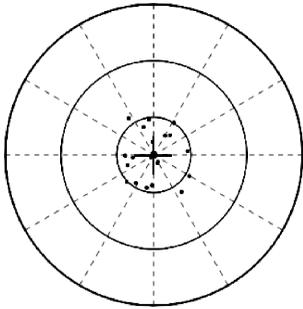


图7 火控周期=80 ms时仿真结果

表1 火控周期=80 ms时弹着点坐标

弹序	X 坐标	Y 坐标
1	-0.08	-0.07
2	0.96	-0.56
3	-0.48	-0.75
4	0.75	-1.01
5	0.91	0.10
6	0.11	-0.18
7	-0.73	-0.72
8	0.43	0.53
9	-0.03	0.35
10	-0.68	1.03
11	-0.77	-0.02
12	-0.19	-0.87
13	0.31	0.51
14	-0.57	-0.07
15	0.54	0.86
16	-0.70	-0.27
17	-0.05	-0.81
18	-0.13	0.94
19	0.09	-0.22
20	-0.28	0.74

本系统中射击间隔一定时,不同的火控周期会产生不同的射击效果。如图8所示,当射击间隔为67 ms时,采用不同的火控周期进行仿真计算,其偏差、散布也不尽相同。由图8可知,当火控周期越接近射击间隔时,弹着点散布中心越接近靶心。

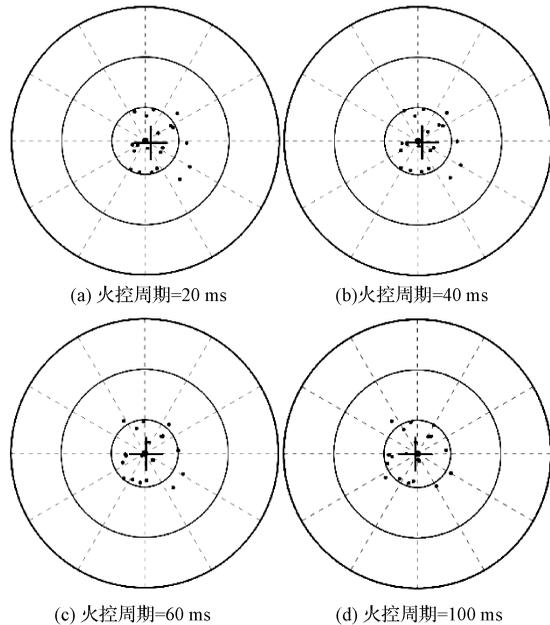


图8 不同火控周期仿真结果

## 6 结论

本文设计了一种高炮对空中目标射弹偏差计算方法,用C语言和C++语言编程实现了这种计算方法并进行了系统仿真。仿真结果表明,本算法准确度较高,能够准确快速地在计算机上进行仿真,并且当火控周期越接近射弹间隔时,弹着点散布中心越接近靶心。本算法可以较准确快速地计算高炮射弹偏差,为初步评估高炮作战效能提供依据,适合在仿真软件中使用。

## 参考文献

- [1] 肖元星,张冠杰.地面防空武器系统效费分析[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 郑赛,顾适夷,范少池.某种弹着点测量技术的研究[J].光电子技术,2014,34(1):57-62.
- [3] 周慧.同帧画幅测量导弹脱靶量精度分析[J].电子测量技术,2015,38(1):83-86.
- [4] 俞峻,张安,刘伟.高炮命中目标位置的解算方法及其精度仿真[J].计算机仿真,2011,28(5):21-25.
- [5] 李强,欧阳攀.基于外弹道的高炮火控算法与仿真[J].火力与指挥控制,2014,39(5):131-134.

- [6] 修观,王良明,杨荣军.线性弹道模型建立与仿真[J]. 海军工程大学学报,2010,22(2):84-91.
- [7] 闫雪梅,苟上会,李顺利,等.小口径高炮射表试验方法探讨[J].火炮发射与控制学报,2015,36(4):69-73.
- [8] 毕翔,韩江洪,刘征宇.约束模糊离散事件系统的监督控制[J].电子测量与仪器学报,2015,29(10):1485-1492.
- [9] 郭荣斌,赵秀才.自动测试系统的发展趋势[J].国外电子测量技术,2014,33(6):1-4.
- [10] 周月阁,叶雪荣,翟国富.基于性能退化和 Monte-Carlo 仿真的系统性能可靠性评估[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1185-1191.

作者简介

张广申,1992 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术。

E-mail:zgssanshengshi@163.com

毛征,1959 年出生,工学博士,教授。主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术。

E-mail:maozheng@bjut.edu.cn

王宁,1989 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术。

张晨,1992 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术。

(上接第 26 页)

参考文献

- [1] 姚军财,刘贵忠.结合人眼对比度敏感视觉特性的视频质量客观评价[J].光学精密工程,2016,24(3):659-667.
- [2] 杨振亚,王勇,杨振东,等.RGB颜色空间的矢量-角度距离色差公式[J].计算机工程与应用,2010,46(6):154-156.
- [3] 易斌,甄江龙,袁韬,等.成像式亮度测量数码相机色彩空间转换矩阵选择[J].电子测量与仪器学报,2015,29(3):427-432
- [4] XIONG W, FUNT B, SHI L, et al. Automatic White Balancing via Gray Surface Identification[C]. Color and Imaging Conference, 2007:143-146.
- [5] 许丽娟.模糊色差图像的白平衡偏差补偿技术[J].电子测量技术,2016,39(7):76-80
- [6] GIJSENIJ A, GEVERS T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(4):687-698.
- [7] GIJSENIJ A, LU R, GEVERS T. Color constancy for multiple light sources[J]. IEEE Transactions on

Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2011, 21(2):697-707.

- [8] 张玉萍,杨学志,方帅,等.改进的高光边缘颜色恒常性算法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2076-2082.

- [9] 陈道清.数字图像处理中颜色重建与校正技术研究[D].天津:天津大学,2010.

- [10] 马玫娟.基于三维查找表的数字图像颜色校正[D].北京:北京工业大学,2009.

- [11] 刘琼,史诺.基于 Lab 和 YUV 颜色空间的农田图像分割方法[J].国外电子测量技术,2015,34(4):39-41.

- [12] XIONG W, FUNT B, SHI L. Automatic white balancing via Grey Surface Identification[C]. In. Proceeding of IS&T/SID Color Imaging Conference (CIC), 2007: 5-9.

- [13] 卢虹,王浩,张奇.色彩校正中适合多种光线的颜色矩阵的实现方法:中国,200510115788.1[P].2006-4-12.

作者简介

郝贵青,1988 年出生,助理工程师,主要研究方向为图像处理、人工智能等。

E-mail:gqhao5945@163.com